

# 人間の知覚と運動の相互作用

— 知覚と運動から人間の情報処理過程を考える —

小堀 聡  
Satoshi KOBORI

理工学部電子情報学科 教授  
Professor, Department of Electronics and Informatics



## 1 はじめに

人間の生体機能はしばしばコンピュータになぞらえて説明されるが、実際の人間の情報処理過程は現在のコンピュータの動作よりもはるかに複雑である。ここでは、人間の複雑な認知過程の例として、知覚と運動の相互作用について解説する。

## 2. 認知過程

### 2.1 人間における情報処理

生物に関わる研究分野では、生物を情報処理システムとして理解しようというアプローチが取られる<sup>1)</sup>。このアプローチは情報科学の概念に基づいており、情報を受け取り、記憶し、変換し、生成し、出力することによって行動するシステム、すなわち、情報の処理を通じて環境との相互作用を行うシステムとして生物を理解するということを基本的な方法論としている。この考え方は認知科学などの人間の認識や行動を理解しようとする学問分野でも同じである。

人間という情報処理システムにおいて、光や音などの入力情報を刺激 (stimulus)、出力行動を反応 (response) という。また、目や耳などの外部からの入力情報を取り入れるための器官を感覚器 (sen-

sor) と呼び、手や足などのような出力行動のための器官を効果器 (effector) と呼ぶ。

目に光が入ると見え、耳に音が入ると聞こえるが、目や耳などの感覚器は外部からの情報を生体内の情報に変換しているだけで、見えたり聞こえたりすること自体は、脳の働きによるものである。

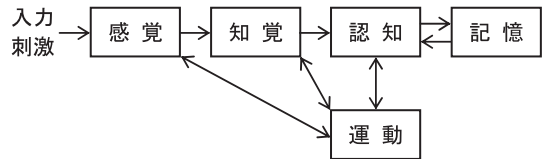


図1 人間の認知過程

入力された刺激に対する脳での情報処理は、低次から高次へといくつかの段階に分けて考えることができる (図1)<sup>2)</sup>。まず、感覚 (sensation) とは、感覚器が刺激によって反応して生じる意識であり、極めて初歩的、要素的、主観的な体験である。これは光や色、音の存在が分かるレベルである。次に、知覚 (perception) は感覚よりも、より高次の働きで、総合的、客観的な判断内容を持っている。これは物の形や大きさ、音のパターンが分かるレベルである。さらに、認知 (cognition) とは、知覚された事物が何であるかを認識する、かなり高次な働きであ

る。これは意味や概念が分かるレベルである。こうした認知を行うためには、経験や学習によって記憶された内容と照合する必要がある。そして、認知された情報を元にして出力行動が決定され、その情報が効果器に送られる。

人間の情報処理過程では、このような物理的刺激を起点とするボトムアップ的な処理だけでなく、状況や文脈に基づいたトップダウン的な処理も並列的に存在していると考えられる。

なお、感覚・知覚・認知という用語は、必ずしも上述の階層性により区別されるとは限らない。たとえば、特定の物理刺激や特定の受容細胞が想定される場合には感覚という用語が用いられるのに対して、より総称的な意味で知覚という用語が用いられることもあるが、感覚と知覚はほぼ同義として扱われ、知覚で統一して表現されることも多い<sup>3)</sup>。また、感覚・知覚・認知という入力系の情報処理過程を広義の知覚という用語で代表させることもある。一方、認知という用語も高次のレベルを示すだけでなく、たとえば、人間の認識や行動の過程全体を認知過程 (cognitive process) と称することがあるように、広義に用いられることもある\*。

## 2.2 知覚と運動の相互作用

人間の情報処理過程については、入力系である知覚と出力系である運動 (motion) は切り離して研究が進められることが多かった。しかし、知覚と運動は別々に存在するのではなく、きわめて複雑に相互に作用しあっている<sup>4)</sup>。以下では、知覚情報を元に運動し、運動によって知覚が変化するというダイナミックな相互作用 (interaction) について述べていくことにする。

---

\*本稿においても、感覚と知覚を厳密に区別する必要がない文脈においては、知覚という用語で統一することにする。ただし、知覚運動協応や感覚運動変換などの用語は慣例に従って用いる。また、認知機能という用語は、高次の機能だけでなく、感覚・知覚系、運動系、記憶系など、すべての認知過程に関わる機能をいうものとする。

まず、感覚系では、感覚器を通して外界情報が取得され、知覚系では、行動を遂行するのに必要な外界情報が抽出され、外界の表象が作り上げられる。視覚の場合でいえば、感覚系において、視覚情報が網膜上に投影され、輝度とスペクトルが処理され、知覚系においては、この情報を元に外界の構造や状態が分析される。その結果、面の再構成として、2次元に投影された網膜像から、脳内で面の3次元構造が推定される。そこでは、視覚モジュールとして、動き、両眼視差、陰影、テクスチャーなどの情報がある程度独立して処理され、それらの出力を統合して、面の再構成が行われると考えられている。

一方、認知系では、知覚系の情報を元にして個別の知識に基づいた対象の同定がなされ、対象や事象に関する情報が記憶される。視覚や聴覚など知覚系で処理された情報を元に、物体、文字・単語、人の顔および表情、相手の動作などが認知される。その際、顔、表情や相手の動作は、自己の動作と対応させて認知されている。つまり、外界から取得された視覚情報だけでなく、自己の運動イメージ生成過程と強い相互作用があり、その相互作用により認知が成立すると考えられている。こうした相互作用を裏付けるものとして、近年のミラーニューロン (mirror neuron) の発見がある<sup>5)</sup>。たとえば、物体の認知は自分自身の行動を起こすために重要であり、運動系との強い相互作用がある。また、文字や単語の認知では、発声系との相互作用や言語処理系との相互作用がある。

次に、身体・空間知覚系では、視覚や聴覚の情報と体性感覚情報が統合されて、対象および自己の身体の位置関係は自己中心座標系によって表現される。これらの情報によって身体運動のイメージが得られ、能動的な身体運動によって対象のイメージが作られる。このうち、自分自身の身体自体の位置関係については、前庭や筋紡錘などの自己受容器からの出力信号と自分自身が発した運動指令信号 (motor command) の知覚系へのコピー信号により認識される。

そして、運動系では、身体・空間知覚系からの出力の情報を元に、目的を達成するための適切な運動の計画が行われ、実行される。視覚情報によって外界の状態がとらえられることにより、運動の計画が立てられる。さらに、運動計画の実現のための個々の運動系列がプログラムされることにより、構成要素となる運動に対する命令が筋肉に伝えられる。運動をスムーズにするには、身体・空間知覚系の情報をフィードバック信号として利用する必要がある。運動系においては、**運動制御 (motor control)** とともに**運動学習 (motor learning)** が重要となる。運動学習は新しい運動系列の学習、**運動技能 (motor skill)** の獲得であり、手続き的知識の獲得である。

さらに、価値判断・感情系では、外界の対象や状態に対して生物学的評価がなされる。感情とは、ある事態やその結果に対する評価的反応であり、記憶情報に基づいて価値判断を行うことは、生物が生きていくうえできわめて重要である。快感や不快感などの感情は、行動を起こす動機づけを促す効果を持つが、動機づけは運動学習だけでなく、さまざまな学習にとってとても重要である。また、感情系は認知系との相互作用がある。

### 2.3 知覚運動協応

わたしたち人間が何かの運動をする際には、ある状況に対する知覚のもとでそれに協応する運動を行い、学習する。人間の行う運動にとって知覚との協調は大変重要であり、運動は運動系のみならず感覚・知覚系との連携により成り立っており、それらの間に整合性のとれた対応関係がなければならない。そうした運動の制御や学習における感覚・知覚系と運動系との対応関係・相互協調関係に関わる認知機能を**知覚運動協応 (perceptual motor coordination)** と呼ぶ<sup>6)</sup>。

たとえば、わたしたちが視覚によって捉えた空間のある位置に自分の手を差し伸べるようなとき、適切な筋肉への運動指令を生成する必要があるが、こうした能力を通常何の努力もせずに発揮している。

しかし、手を伸ばすとか、物をつかむといった一見単純な行為を分析してみると、知覚運動協応がいかに複雑であるかが見えてくる。まず、視覚情報と体性感覚情報を統合して、つかもうとする対象と手の位置を自己中心座標系によって表現する必要がある。次に、適切な筋肉への運動指令のために、知覚入力と適切な運動出力との間の写像規則を獲得しておかなければならない。こうした対象と手の位置の表現と写像規則を結びつけることで**運動プログラム (motor program)** を生成することができる<sup>7)</sup>。

しかしながら、わたしたちはそのような写像規則を発達の過程で学習により獲得しているので、**感覚運動変換 (sensorimotor transformation)** を通常何の努力もせずに用いることができる。そこで、研究上の手法として、そうした感覚運動変換を一時的かつ擬似的に破壊する方法が用いられる。そのような例として有名なのがプリズムの順応実験である。これはプリズムを介して視野をずらした状態で到達運動を行わせても、試行を繰り返すことにより正しく目標に手を伸ばせるようになるというものである。つまり、この実験により、感覚・知覚系と運動系の新しい対応関係に順応していく過程を調べることができる。

その他、知覚運動協応について研究する手法としては、発達の研究において、感覚運動変換の写像規則を学習していく過程を検討していく方法や、臨床研究において、写像規則が失われた状態を検討していく方法も考えられる。

## 3. 運動の制御と学習

運動制御に関する研究では、いかに運動の技能が遂行されているかを検討する。運動制御の研究の焦点は、随意運動を特定し、生成し、修正することに関わる機構と過程にある。一方、運動学習研究では、いかにして運動技能が獲得され、記憶されるかという問題を追究する<sup>8)</sup>。

### 3.1 運動制御の方法

人間の到達運動を例にあげると、これを行うには3つの問題を解かなければならない<sup>9,10)</sup>。まず、視覚の作業座標において、現在位置から目標までの軌道を決定する必要がある。次に、外部座標で表現された軌道を関節角や筋長といった運動学的な身体座標に変換しなくてはならない。最後に、運動学的な身体座標で表現された軌道を実現するために、筋張力のパターンや神経系からの運動指令の時系列などを求める必要がある。これらは計算論のレベルでの議論であり、実際の脳においてこのような処理がされているかは分らない。しかし、このように考えると、到達運動を行うときに中枢神経系が行う重要なことは、軌道の計画、座標の変換、制御であることが分かる。

座標変換の問題は以下の通りに定義できる。多関節腕がある姿勢をとると各関節の角度  $\theta$  が決まり、その運動学的な関係  $g$  によって、作業空間における手先の位置  $x$  が定まる。

$$x = g(\theta)$$

関節角  $\theta$  から手先位置  $x$  を求めることを順キネマティクス、逆に  $x$  から  $\theta$  を求めることを逆キネマティクスと呼ぶ。実際の到達運動においては、網膜上に映った目標の位置座標から、手先が目標にあるような腕の姿勢（関節角や筋長などの身体座標）を計算することが逆キネマティクスの問題である。

一方、制御の問題は以下の通りに定義できる。一般の腕の動作は、筋張力や関節トルクなどの運動指令  $\tau(t)$  と関節角  $\theta(t)$  およびその角速度  $\dot{\theta}(t)$  との間の非線形な微分方程式で表される。

$$\frac{d\theta}{dt} = f(\theta, \dot{\theta}, \tau)$$

腕のある初期状態  $\theta(t_0)$ 、 $\dot{\theta}(t_0)$  に運動指令  $\tau(t)$  ;  $t_0 \leq t \leq t_f$  を与えると、腕が動いて関節角の軌道  $\theta(t)$  ;  $t_0 \leq t \leq t_f$  が生成される（これは上記の微分方程式を積分することに対応する）。このとき、運動指令  $\tau(t)$  から運動軌道  $\theta(t)$  を推定することを順ダイナミクス、また逆に、 $\theta(t)$  から対応する

$\tau(t)$  を求めることを逆ダイナミクスと呼ぶ。

制御工学の分野では、運動制御を行う方法は、フィードバック制御（feedback control）とフィードフォワード制御（feedforward control）という2つに大別できる<sup>11)</sup>。フィードバック制御では、制御対象に計測装置を付けて常に状態を調べて、誤った方向に動いたときには運動方向を修正するような運動指令を生成する（図2上）。一方、フィードフォワード制御では、あらかじめ決められた運動指令を1回読み出すだけで、フィードバック制御とは異なり、運動途中での修正を行わない（図2下）。

中枢神経系はどちらの方法でも運動制御を行うことができる。フィードバック制御が基本ではあるが、時間的にフィードバックの働く余地がない、あるいは、フィードバックを待っている間は、制御が間に合わない場合にはフィードフォワード制御が必要となる。

一般に、生体がフィードバック制御を行う運動のことを修正運動（corrective movement）、フィードフォワード制御を行う運動のことを弾道運動（ballistic movement）という。

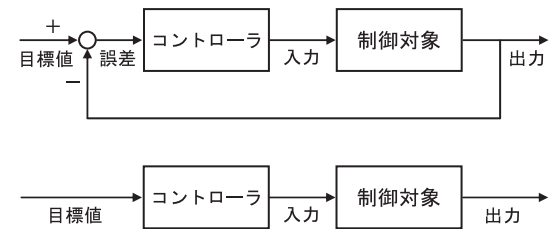


図2 フィードバック制御（上）とフィードフォワード制御（下）

人間が運動を行うときに用いている感覚は、主として視覚と体性感覚である。修正運動を行う場合には、これらの感覚を通してフィードバック情報を得ることになるが、生体において感覚フィードバックが有効に働くには、かなりの時間遅れがあることが知られている。したがって、もし時間遅れのあるフィードバックだけを頼りにしていたのでは、ぎこちない運動になってしまう。そこで、人間はまず弾道

運動で手先を目標の周辺まで素早く移動させ、次に視覚や体性感覚を頼りに比較的ゆっくりした速度で正確に目標に到達するという方法を用いている。

### 3.2 内部モデル

フィードバック制御では、腕を動かしながらその位置や速度の大きさなどを種々の感覚器官で測り、実際の運動軌道と目標軌道との誤差に応じて、時々刻々と運動指令を修正する。フィードバック制御系の構成は単純明瞭であるが、生体におけるフィードバックの時間遅れ（数十～100 数十 ms）などを考慮すると、この制御系だけでは人間の手足のように速くて滑らかな運動を作り出すことは困難であると考えられる。

一方、フィードフォワード制御では、制御対象である腕のダイナミクスに対応して、前もって運動指令を計算し腕を動かす。それゆえ、腕の入出力特性（運動指令と運動軌道の動的な関係）を正確に知る必要がある。ところが、制御対象が多関節腕などの場合、そのダイナミクスは極めて複雑になるので、入出力特性を求めることは容易でない。たとえば、人間の腕は少なくとも7自由度はあり、その運動には10数種類の筋が関与するとされている。また身体の成長によってパラメータが変化することにも、適応的に対応しなければならない<sup>10)</sup>。

神経回路に関する多くの研究から、神経学習システムによって腕のような複雑で可変な制御対象のダイナミクスなどが計算される可能性が示されている。すなわち、脳神経系に腕の入出力特性や外部環境を表現する神経回路網があれば、キネマティクスやダイナミクスを計算することができる。これは制御対象や外界に対するモデルと見なすことができ、これを**内部モデル (internal model)**と呼ぶ<sup>12)</sup>。すなわち、内部モデルとは、脳外に存在する、ある対象の入出力特性を模倣できる中枢神経機構である。内部モデルが運動学習に伴って獲得され、また環境などに応じて適応的に変化するメカニズムが備わっていれば、迅速な運動制御が可能となる。

フィードフォワード制御では、システムの出力を観測することなく、あらかじめ諸条件を考慮して綿密なる計算のもとに制御を行うことになる。すなわち、何らかの予測が必要となる。運動における予測の問題については、近年運動学習の分野において重要な概念になりつつある内部モデルと関連づけて議論されることが多い。一般的に、制御対象の入出力関係をそのまま表現し、与えられた入力からシステムの出力を推測するモデルを**順モデル (forward model)**、その逆に、制御対象の入出力関係とはまったく逆の入出力関係を持ち、システムの出力から与えるべき入力を推測するモデルを**逆モデル (inverse model)**という。たとえば、筋骨格系を思い通りに動かすためには、順/逆キネマティクスや順/逆ダイナミクスのモデルを獲得しなければならない。順モデルや逆モデルは、神経回路網で構成され、学習とともにそのシナプスの結合荷重を調整することによって獲得される<sup>13, 14)</sup>。

制御対象の順モデルがあれば、ある運動指令を入力したときにどんな軌道が出力されるかを予測することができる。これはまさに脳内シミュレーションと呼べるものであり、この予測に従って前もって運動指令を修正し、制御対象を正しく動かすことが可能になる。一方、逆モデルがあれば、目標軌道を出力するための運動指令を計算することができる。

身体の成長とともにキネマティクスやダイナミクスが大きく変化することを考えると、逆モデルが生まれつき脳内にあるとは考えられず、さまざまな運動を繰り返し、学習することで獲得するに違いない。しかし、逆モデルを学習するには計算論的な困難が伴う。すなわち、一般的に運動学習においては、実現したい運動パターンが示されても、それを生成する運動指令そのものは分からないので、運動指令に関する教師信号が直接与えられないという問題が生じる。

こうした問題を解決する運動学習の方法として、ここではフィードバック誤差学習 (feedback-error-learning)<sup>15, 16)</sup>について説明する (図3)。フー

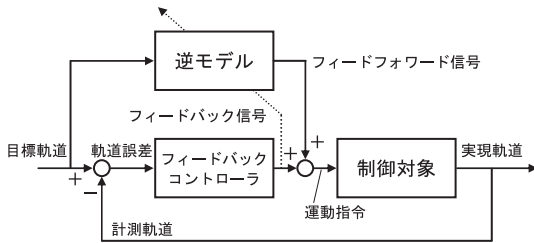


図3 フィードバック誤差学習

ドバック誤差学習は、学習が進むにつれて修正運動から弾道運動へと移行していく様子を、制御工学的な考え方でモデル化している。まず、学習の初期段階では、次のように情報が流れる。ある目標軌道が入力されたときに、実際に出てきた軌道と目標軌道を比較して誤差を求め、この誤差を減少させるような運動指令をフィードバックコントローラが出力する。これが修正運動だけでぎこちない運動をしている状態であり、これだけでは何の進歩も見られない。そこで、フィードバックコントローラとは別の経路を設け、この部分に学習の機能を持たせる。具体的には、目標軌道を入力として与え、フィードバックコントローラの出力を誤差信号として入力して訓練することにより、目標軌道が与えられるとそれを実現するために必要な運動指令を出力するようにする。制御対象にとっての入力は運動指令で、出力は実際の軌道であるが、この部分の入力は目標軌道で、出力は運動指令になっている。すなわち、この部分は逆モデルであるといえる。このシステムは、学習の初期ではフィードバックコントローラを用いることにより、とりあえずぎこちなく修正運動を行っているが、訓練が進むにつれて次第に内部モデルの精度が上がり、修正運動を行わなくても、正確な弾道運動ができるようになる。

内部モデルが存在することを示す研究例はいくつもあるが、近年の研究では、課題の学習の前後での脳活動が比較され、その差異は内部モデルの学習の結果として解釈されている。たとえば、今水らは、回転マウスという課題を用いて、新規の感覚運動変換を学習するときの小脳活動を調べる実験を行い、

内部モデルを反映すると考えられる脳活動を捉えた<sup>17)</sup>。しかし、彼らの実験方法では、内部モデルの働きと視覚フィードバックの役割を区別することができない。また、そのような内部モデルが表しているものは何か、どれだけの数のモデルが関わっているのかなどは不明確である。

### 3.3 運動技能の学習

わたしたち人間は、繰り返し練習することにより、自転車に乗ったり、ピアノを弾いたりすることができるようになるが、そうした運動技能の獲得は日常生活にとって必須の機能であり、身近な問題でもある。練習を通じて運動が未熟な段階から熟練した段階へと変容していく過程は運動学習の重要なテーマの一つであるが、この問題は運動系や感覚系にとどまらず、注意 (attention) や自動化 (automaticity) といった知覚系、認知系の働き、さらには記憶系にも関わる複雑な問題である<sup>18)</sup>。運動技能の学習は、知覚運動協応の習熟であるという観点から、**知覚運動学習 (perceptual motor learning)** と呼ばれることもある。

運動技能の学習は、認知の段階、連合の段階、自律の段階の3つに分けることができるとされる<sup>19)</sup>。技能学習は、学習者がまず課題についての知識を得ることから始まる。これが認知の段階である。

次の連合の段階では、練習により遂行の誤りが減少し、遂行の速度も増す。この段階では、行動のフィードバックが重要になる。自分の行動が目標の行動とどの程度異なっているかという情報は、**結果の知識 (knowledge of result ; KR)** と呼ばれ、技能学習に重要な役割を果たしている<sup>20)</sup>。

3番目の自律の段階では、一連の動作はまとまって遂行されるようになり、動作の遂行はスムーズになる。反応が自動的に行われる段階であるといえる。こうした運動学習における自動化は、課題遂行そのものに心的資源を必要とする制御的処理からそれを必要としない自動的処理へと変容し、学習が進むにつれて、**認知的負荷 (cognitive load)** が軽減さ

れていくことに関連しているとされる<sup>21)</sup>。一般に運動学習の評価には、制御成績のような指標が用いられることが多いが、制御成績の向上が認知的負荷の軽減とどのように関係するかについては、十分に検討されているとはいえない。つまり、運動学習における自動化がどのように進むのか、それをどのように測定するのか、などについての一致した見解はこれまでほとんど見られない<sup>22)</sup>。

練習して習得した技能は、記憶に留めて必要なときに活用できるが、それ以外に、練習して得た技能は、他の場面に応用することができるという側面もある。つまり、ある技能を習得しておく、別の新しい技能の習得に有利であるということがある。たとえば、ヴァイオリンが弾ける人は、チェロの学習が容易であろうし、スケートのできる人は、スキーの学習が早いであろうと思われる。技能の学習はその特定の技能の習得だけでなく、類似の技能の習得にもなっていると考えられる。このように、ある学習の効果が、類似の学習に影響することを**学習の転移 (transfer of learning)**と呼ぶ<sup>23-26)</sup>。

ある技能についての先行学習が、別の技能の後行学習に促進的な効果を与える場合を**正の転移 (positive transfer)**といい、逆に、先行学習が後行学習に妨害的な効果を与える場合を**負の転移 (negative transfer)**という<sup>27)</sup>。たとえば、ペン字を習うと筆の使い方が上手になるような場合が正の転移であり、バドミントンで覚えたスナップの使い方がテニスでうまくいかない場合が負の転移である。

転移の測定方法としては、先行学習を行う実験群と行わない対照群を設定し、後行学習における両者の評価値を比較する方法が一般的である。その際、実験群の評価値が対照群の評価値を越えると正の転移になり、逆の場合は負の転移となる<sup>28)</sup>。

運動技能課題においては一般的には、正の転移はよく見られるが<sup>29)</sup>、負の転移の実験的証拠<sup>30)</sup>を見つけることはかなり難しく、見つけられたとしてもしばしばはかないものであるとされる。また、どのような場合に正や負の転移が見られるかについては、

一般的な原則として、正の転移は2つの課題が類似した刺激事態への反応として、類似または同一の運動を含むときに最もみだされやすいとされ、負の転移は2つの課題が類似した刺激事態に対して拮抗的または両立不可能な反応を要求するときに最も観察されやすいとされる<sup>20)</sup>。

#### 4. おわりに

本稿では、人間という情報処理システムに対する入力である感覚・知覚系と出力である運動系について述べ、両者の密接な関係について解説した。こうした知識は人間についての理解を深めるだけでなく、人間の持つ優れた機能を機械に応用する際の参考にもなるので、広く理工系全般にとって重要な事項であるといえる。興味を持った方は、下記に紹介した参考文献を読まれるとよいと思う。

#### 参考文献

- 1) 安西祐一郎, 市川伸一, 外山敬介, 川人光男, 橋田浩一: 脳と心のモデル. 岩波書店 (1994)
- 2) 樋渡清二: 視聴覚情報. 樋渡清二 (編), 視聴覚情報概論, 昭晃堂, pp.3-6 (1987)
- 3) 樋口貴広, 森岡周: 身体運動学. 三輪書店, pp.2-3 (2008)
- 4) 乾敏郎: 知覚と運動. 乾敏郎 (編), 認知心理学 1 知覚と運動, 東京大学出版会, pp.1-13 (1995)
- 5) Rizzolatti G., Craighero L.: The mirror-neuron system. Annual Review of Neuroscience, Vol. 27, pp. 169-92 (2004)
- 6) 阪口豊: 知覚・運動協応. 日本認知科学会 (編), 認知科学辞典, 共立出版, p.541 (2002)
- 7) McLeod P.: Perceptual motor coordination, Eysenck M. W. (Ed), The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology, Blackwell Publishers, pp.262-267 (1990)
- 8) Kerr B.: Motor control and learning. Eysenck M. W. (Ed), The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology, Blackwell Publishers, pp.237-240 (1990)
- 9) 今水寛: 運動制御と視覚・自己受容感覚. 乾敏郎 (編), 認知心理学 1 知覚と運動, 東京大学出版会, pp.217-247 (1995)
- 10) 宇野洋二: 運動制御. 榊原学, 吉岡亨 (編), システムとしての脳, 共立出版, pp.135-169 (2003)

- 11) Rosenbaum D. A. : Human Motor Control (2nd ed.). Academic Press, pp.25–32 (2010)
- 12) Wolpert D. M., Miall R. C., Kawato M. : Internal models in the cerebellum. Trends in Cognitive Sciences, Vol.2, pp.338–347 (1998)
- 13) Wolpert D. M., Kawato M. : Multiple paired forward and inverse models for motor control. Neural Networks, Vol.11, pp.1317–1329 (1998)
- 14) Imamizu H., Uno Y., Kawato M. : Adaptive internal model of intrinsic kinematics involved in learning an aiming task. Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance, Vol.24, pp.812–29 (1998)
- 15) Kawato M., Furukawa K., Suzuki R. : A hierarchical neural network model for control and learning of voluntary movement. Biological Cybernetics, Vol.57, pp.169–185 (1987)
- 16) Kawato M., Gomi H. : A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error-learning. Biological Cybernetics, Vol.68, pp.95–103 (1992)
- 17) Imamizu H., Miyauchi S., Tamada T., Sakaki Y., Takino R., Puetz B., Yoshioka T., Kawato M. : Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. Nature, Vol.403, pp.192–195 (2000)
- 18) 阪口豊 : 運動習熟. 日本認知科学会 (編), 認知科学辞典, 共立出版, p.59 (2002)
- 19) Fitts P. M. : Perceptual-motor skill learning. Melton A. W. (Ed.), Categories of human learning, Academic Press (1964)
- 20) Mazur J. E. : Learning Motor Skills. Learning and Behavior (6th ed.), Pearson Prentice Hall, pp.300–322 (2006)
- 21) Schneider W., Shiffrin R. M. : Controlled and automatic human information processing : I. Detection, search, and attention. Psychological Review, Vol.84, pp.1–66 (1977)
- 22) Brown T. L., Carr T. H. : Automaticity in skill acquisition ; mechanisms for reducing interference in concurrent performance. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, Vol.15, pp.686–700 (1989)
- 23) 篠原彰一 : 学習心理学への招待 [改訂版] 学習・記憶のしくみを探る. サイエンス社, pp.210–226 (2008)
- 24) 春木豊 : 技能学習. 山内光哉, 春木豊 (編), グラフィック学習心理学, サイエンス社, pp.93–124 (2001)
- 25) Adams J. A. : Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. Psychological Bulletin, Vol.101, pp.41–74 (1987)
- 26) Schmidt R. A., Lee T. D. : Retention and Transfer. Motor control and learning : A Behavioral Emphasis (4th ed.), Human Kinetics, pp.432–459 (2005)
- 27) Blais C., Kerr R., Hughes K. : Negative transfer or cognitive confusion. Human Performance, Vol.6, No.3, pp.197–206 (1993)
- 28) 西田保 : 転移. 中島義明他 (編), 心理学辞典, 有斐閣, pp.615–616 (1999)
- 29) Kobori S., Haggard P. : Internal models and transfer of learning in pursuit tracking task. Proceedings of European Cognitive Science Conference 2007, pp.498–503 (2007)
- 30) 小堀聡 : 反転を伴うトラッキング課題における学習とその転移. 情報科学技術レターズ, Vol.6, pp.295–298 (2007)