

運動が上達するとは

片山正純

■ 研究のねらい

「コップをつかんで水を飲む」運動を考えてみよう。この運動では、まず周囲からコップを探し出してコップまで手を伸ばし、それからコップをつかんで水をこぼさないように口まで運ぶ必要がある。このような運動はほとんど無意識的に行われるため、水を飲むのに悩む人はいないであろう。しかし、無意識的に実行できるからといって脳が働いていないわけではない。実は、上記のような運動を正確に実行するために、脳が正確に計算しているから「コップをつかんで水を飲む」ことができるのである。

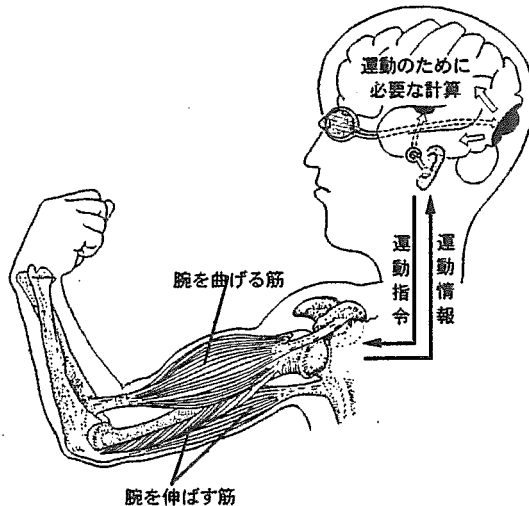


図1 人の運動制御系

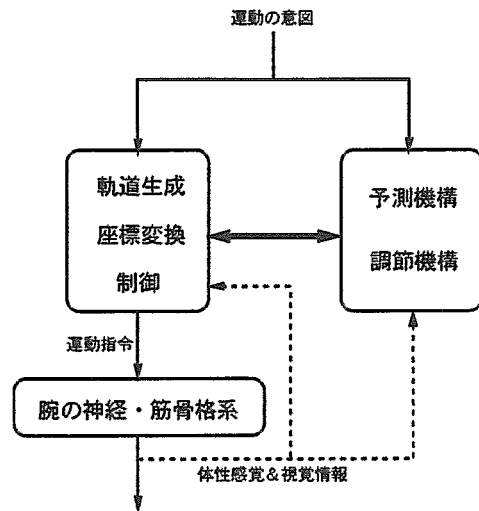


図2 到達運動のための3つの問題と調節機構・予測機構

脳が運動するために行っている計算について簡単に説明する。図1に示すように、腕や手をどのように動かすかを脳の中で計画し、その計画された運動が実現できるように筋を収縮させるための運動指令を計算する。その運動指令が脊髄を通過して筋まで送られる。そして、腕がどのように動いているかの運動情報（関節角や筋の長さなどの体性感覚情報や視覚情報）が脳まで戻ってくることによって、脳は腕がどのように動いているかを知ることができる。

さらに詳しく説明すると、上記のコップまで手を伸ばす運動を実行するために解かなければならない3つの問題：

- (1) 軌道生成：手先の初期位置から目標位置までの手先軌道の決定、
- (2) 座標変換：手先の位置から腕の関節角への変換、
- (3) 制御：(1) で決定された軌道を正確に実行するための運動指令の計算、

がある(図2参照)。これらの3つの問題において冗長性(解が多数存在すること)が存在する。軌道生成では手先軌道が無数に存在し、座標変換では腕の姿勢が無数に存在する。さらに、制御においても運動指令の組み合わせが無数に存在する。つまり、筋は収縮して引っ張る力しか発生できないため、図1に示すように関節を曲げる筋(屈筋)と伸ばす筋(伸筋)が拮抗した構造になっている。従って、腕を曲げる筋と伸ばす筋の張力の差で腕が運動するため、これらの筋への運動指令の組み合わせは無数に存在する。これらの冗長性は、上記3つの問題を解くのを難しくする反面、手先軌道を調節したり、腕の姿勢を調節したり、運動指令を変えることにより腕の柔らかさ(粘弾性)が調節できることを意味している。つまり、様々な運動に応じて調節できるため、運動制御系において「調節機構」は重要な役割を果たしている。また、脳から運動指令が出て、運動情報が脳に戻ってくるまでに少なくとも50ミリ秒以上必要であり、また視覚情報では150ミリ秒以上必要となる。この時間遅れ(むだ時間)のために、ボールを打つなどの運動では、運動情報(フィードバック情報)を用いた調節では十分な効果が期待できない場合がある。このため、打つ位置と時間や腕とボールの動的な相互作用などを予測する「予測機構」が必要となる。この機構を用いることにより、より正確で安定な運動が可能となる。さらに、この時間遅れのために、フィードバック制御(上述の運動情報を利用した制御)だけでは正確に運動できない。そこで、腕や対象物の内部モデル(腕や対象物の脳内表現)が脳内に獲得されることにより、運動が到達すると考えられている(「学習機構」)。

以上のように、人の運動制御系では、学習機構、調節機構、予測機構の3つの機構と到達運動のための3つの問題を解く機構は密接に関係している。しかしながら、従来までの研究では、図2に示したような統一的な立場で研究されていない。特に、制御の問題では、高次運動制御系の役割の1つである運動学習、または筋や反射の性質に着目した研究は数多く存在するが、筋や反射の性質(可変粘弾性)などの調節機構を積極的に利用した運動学習制御機構の研究はなされていない。しかし、高次脳機能である学習機構と神経・筋骨格系に基づいた調節機構が密接に関係していることは明らかであり、切り離して研究することはできない。従って、人の運動学習機構を解明するためには、これらを独立に研究するのではなく、統一的に研究することが必要不可欠である。

さらに、人の運動において、運動の目的(例えば、水が飲めること)を達成することが重要であるため、目的の達成確率が向上するように手先軌道や腕姿勢や腕の柔らかさなどが調節されるべきである。また、運動の種類や目的に応じて、より合理的、および効果的に調節できるようになることが必要である。これが、人の巧みな運動における「ワザ(運動スキル)」であると考えることができる。

以上のような観点から、本研究では、図2に示す運動制御スキームに基づいて運動制御系を統一的に取り扱うことにより、人の巧みな運動を可能にする運動スキルを実現するための運動学習制御モデルを構築し、運動学習制御機構の解明を目指す。本報告では、制御の問題に焦点を絞り、上記観点から運動学習の1つの戦略を提案し、この戦略に基づいて学習制御モデルを構築したので以下で説明する。

■ 研究成果

本研究では、「運動スキルとは、正確に実行し、最小の時間で、最小のエネルギーで、運動の目的を達成できるように学習された能力である」と定義し、この定義に基づいて運動スキルを実現するための運動学習の1つの戦略を提案し、この戦略に基づいた調節・予測機構を用いた運動学習制御モデルを構築した。以下でこの運動学習の戦略、および学習制御モデルについて説明する。

運動学習の1つの戦略：

高次運動制御系では、運動の立案・計画や運動学習などの優れた情報処理を行うことにより、正確な運動が可能となる。この反面、前述のように大脳や小脳を介した制御系では、その制御ループの時間遅れが大きくなるため、予期できない外乱が与えられたときに素早く対処することができない。また、未学習の運動を正確に実行することもできない。一方、筋や反射系では時間遅れが小さいため、予期できない外乱が生じたとき素早く反応することができる。さらに、腕を硬くすることにより、運動誤差をある程度小さくすることができる。しかし、筋や反射だけで正確に運動させることはできない。以上より、高次運動制御系と低次運動系（筋や反射など）のそれぞれの役割を相補的に融合・統合することが可能となる。つまり、未学習時などにおいて運動誤差が大きいとき、腕を硬くすることにより運動誤差を小さくすることができる。しかし、腕を硬くするためには拮抗した筋の活動を同時に大きくする必要があるので、無駄なエネルギーを消費することになり、運動スキルの観点から望ましくない。従って、腕を柔らかくした状態でも運動が正確に実現できることが望ましい。この観点から、学習初期では腕を硬くして運動の精度を向上させ、学習が進むにつれて腕を柔らかくする。また、運動を遂行するのに要する運動時間も同様に变化させることにより同様の効果がある。つまり、運動時間を長くしてゆっくり運動することにより、慣性力などの動的な作用が小さくなるために運動誤差は小さくなる。しかし、これも運動スキルの観点から望ましくない。従って、学習初期では腕をゆっくり運動させ、学習が進行するにつれて徐々に速くすれば良いことになる。これが提案する運動学習の1つの戦略である。この戦略は次式として一般的に表すことができる。

$$p(t) = f(e(t)) + p_{\min}$$

ここで、 f は単調増加関数であり、 p_{\min} はパラメータ p の最小値である。この調節則では、運動誤差 e の値に応じて調節可能なパラメータ p の値が調節される。運動学習過程において運動誤差は徐々に減少するため、この調節則によりパラメータ（粘弾性や運動時間など）の値を調節することができる。従って、学習が進行するにつれて、徐々に柔らかく、速い運動に移行してゆく。学習後には獲得した内部モデルにより正確な運動が実現でき、上記戦略に基づいた調節により最小の時間および最小のエネルギーが実現できる。このため、本研究において定義した運動スキルが実現できることになる。

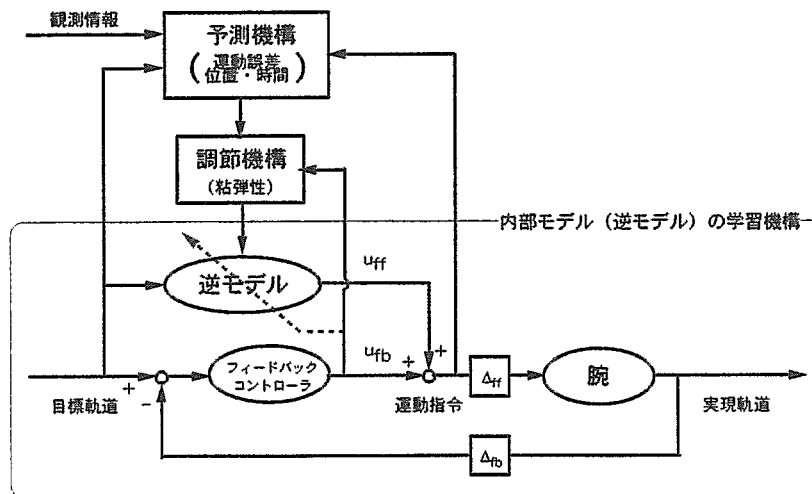


図3 調節・予測機構を用いた学習制御モデル

学習制御モデル：

腕の粘弾性に関する調節・予測機構を用いた学習制御モデルを図3に示す。上記で提案した運動学習の戦略は、どのようなタイプの学習制御モデルにも適用することができるが、ここではフィードバック誤差学習（川入ら，1987）に適用する。フィードバック誤差学習では、フィードバックコントローラ出力を逆モデル（内部モデルの1つ）の修正信号として用いるため、フィードバックコントローラ出力が小さくなるように逆モデルが学習される。このため、この学習制御モデルでは、上記調整則における運動誤差 e としてフィードバックコントローラ出力を用いた。未学習の運動や予測できない外乱が与えられたときフィードバックコントローラ出力が大きくなり、腕は硬くなる。腕が硬くなることにより、運動誤差は比較的小さく抑えられる。さらに、図3に示した予測機構を用いることにより、より合理的に、かつ効果的にパラメータの値を調節することが可能となる。例えば、腕の順モデル（内部モデルの1つ）を用いることにより、腕の運動軌道を予測することができるため、目標軌道と予測軌道の差により運動誤差を推定することができる。この推定誤差を上記調整則に適用することにより、時間遅れに関係なく、腕の動特性を考慮した調節が可能となる。

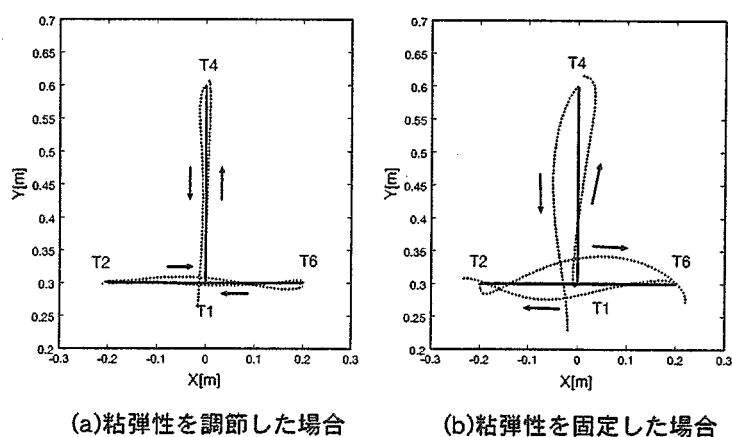


図4 学習前の制御結果

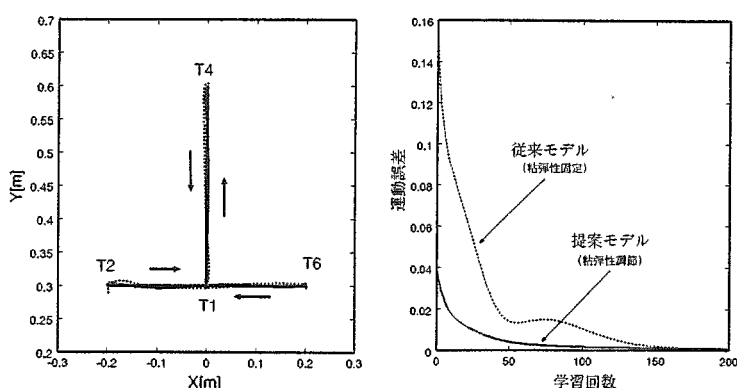


図5 学習後の制御結果

図6 学習曲線

結果：

提案した運動学習の戦略の有効性を示すために、未学習の目標運動について、腕の柔らかさ（粘弾性）を調節した場合と固定した場合の制御結果を比較した。それぞれの制御結

果を図4 (a; 調節機構を用いた場合; b: 調節機構を用いない従来モデルの場合) に示す。この比較から、粘弾性を調節することにより、未学習時においてもある程度の精度で運動が可能となっており、提案した戦略および学習制御モデルの有効性が確認された。さらに、図5に学習後の制御結果を示す。この結果より、学習後には両方の場合とも高精度の運動が可能となっている。また、図6に学習曲線(学習過程における運動誤差の変化)を示す。この学習制御では、図6に示したように学習が進行するにつれて運動誤差が減少しているため、提案した運動学習の戦略(上記調整則)により腕は学習初期に硬くなり、学習が進行するにつれて徐々に腕は柔らかくなる。上記結果では、学習後には腕運動中に計測された弾性係数の値になるように設定してあり、学習により弾性係数の値はほぼ $1/3$ に減少した。学習初期に腕を硬くするために各筋への運動指令が大きくなっており、筋が必要以上に活動して余計なエネルギーを浪費していることになる。しかし、学習後に腕は柔らかくなるために最小限の筋活動で運動が正確に行えるようになっていく。また、この結果では運動時間を固定(750ミリ秒)しているが、上記の調整則を用いて粘弾性と同様に運動時間を調節することができる。つまり、学習初期には運動がゆっくりになり、学習が進行するにつれて運動誤差が減少するため、徐々に速く運動するようになる。以上の結果より、学習後には正確に、より速く、最小限のエネルギーで運動できることになる。従って、本研究において定義した運動スキルが実現できたことになる。最後に、提案した運動学習の戦略の利点として、

- (1) 未学習の運動でも比較的精度良く運動できること、
- (2) 予期できない外乱に対する応答が向上すること、
- (3) 未知の対象物を把持した時の運動でも比較的精度良く運動できること、
- (4) 学習後にはより柔らかく、より速く、より正確に運動できるようになること、

などが挙げられる。ここで強調すべきことは、低次運動系の筋や反射の性質(可変粘弾性など)を利用したシンプルな戦略(上記調整則)を用いるだけで上記のような利点があり、さらに運動スキルが実現できることである。

本研究により提案した運動学習の戦略や学習制御モデルの妥当性については、現在のところ明確になっていない。現在、人腕の運動を計測することにより、提案した運動学習の戦略の妥当性を検証しているところである。

■ 今後の展開

本研究のねらいは、図2に示したように、調節・予測機構と到達運動の3つの問題を解く機構を統一的に取り扱うことにより、人の巧みな運動を可能にする運動学習機構をモデル化することである。この観点から、本研究では、制御の問題に焦点を絞り、提案した運動学習の戦略および学習制御モデルの有効性を示した。今後、本報告で取り扱った制御の問題だけでなく、軌道生成と座標変換の問題を取り扱う必要がある。なぜなら、人の運動の巧みさは、手先の運動軌道、腕の姿勢、腕の柔らかさ、力などのパラメータが同時に調節された結果として実現されているからである。さらに、従来より提案されているトルク変化最小規範や運動指令変化最小規範により計画された手先軌道は、粘弾性や運動時間に依存して変化する。このため、より最適な運動を実現するためには、制御の問題だけでなく、軌道生成と座標変換の問題を同時に解く必要がある。このような観点から、図2に示した運動制御スキームに基づいて人腕の運動学習機構をモデル化してゆくことにより、人の運動の巧みさや熟練者のわざ(つまり、運動スキル)が獲得される仕組みを明らかにしてゆきたい。

さらに、この仕組みをロボットに適用することにより、人と同じように運動が上達するロボットを創りたいと考えている。人と同じように上達できるロボットは、限られた環境

だけでなく様々な環境ににおいて繰り返し訓練することにより、目的とする運動やタスクが達成できるようになる。本研究により得られた成果をロボットに適用するためには、人の運動系と似た機構・特徴をもつロボットを用いる必要がある。また、人に似たロボットを用いることにより、人に親和的なロボットが実現できるはずである。そこで、本研究では、筋と同様の性質をもつ人工筋（空気圧で駆動し、可変粘弾性をもつ）を用いたロボットアーム（ラバチュエータ・ソフトアーム、ブリヂストン製）に適用することにより、人と同じように上達させたいと考えている。また、人に似たロボットを用いることにより、新たな問題点の発掘や新しい発想が生まれることを期待している。

成果リスト

論文：

- Katayama, M., M. Kawato: A neural control model which learns virtual trajectories for multi-joint arm movements, *Biological Cybernetics*, submitted.
- 福田浩士, 福村直博, 片山正純, 宇野洋二：ヒトの把持運動制御における対象物認知と把持形状生成, *電子情報通信学会論文誌*, 1998 投稿中.

解説および書籍：

- 片山正純：腕の運動計測と運動制御；計測自動制御学会誌, Vol. 36, pp.615-621, 1997.
- 片山正純：仮想軌道制御仮説, *脳科学ハンドブック*, 朝倉書店, 1998 印刷中.
- 片山正純：視覚と腕の運動の統合, *視覚情報処理ハンドブック*, 朝倉書店, 1998 印刷中.

口頭発表 国際会議：

- Katayama, M., S. Inoue, M. Kawato: A strategy of motor learning using adjustable parameters for arm movement, *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp.82370-2373, 1998.
- Katayama, M., K. Asada, X.Z. Zheng, M. Yamakita, and K. Ito: Self-organization of a task oriented visuo-motor map for a redundant arm. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp.302-308, 1996.

口頭発表 国内：

- 井上聡, 片山正純, 福村直博, 宇野洋二, 川人光男：粘弾性調節及び運動時間調節を用いた内部モデル学習制御, 第10回バイオエンジニアリング講演会, 広島大学, 419-420, 1998.
- 井上聡, 片山正純, 福村直博, 宇野洋二：粘弾性調節機構を用いた筋骨格系の学習制御モデル, 第12回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.341-344, 1997.
- 福田浩士, 福村直博, 片山正純, 宇野洋二：ヒトの把持運動における力分配, 第12回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.421-424, 1997.
- 小池武, 片山正純, 鄭心知, 伊藤宏司：対象物把持のための手の形状生成モデル, *電子情報通信学会技術研究報告 NC95*, Vol.96, No.599, pp.15-22, 1997.
- 北村卓也, 片山正純, 鄭心知, 伊藤宏司：両手協調動作における手先インピーダンス同定, 第11回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.353-356, 1996.
- 小池武, 片山正純, 鄭心知, 伊藤宏司：対象物操作における Preshaping のモデル化, 第11回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.205-208, 1996.
- 山口晃, 片山正純, 鄭心知, 伊藤宏司：筋電信号を用いた手・腕動作の推定, 第11回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.349-352, 1996.