《教育講演》

運動と力の統一的学習・制御モデルとその応用*1

小池 康晴*2

はじめに

人は生まれたばかりの時は、体を自由に動かすことができず、何年もかけて正確な運動ができるように学習を行う。運動制御を考えると、大人になって実現されている運動を説明できるだけでなく、その運動ができるようになる過程が理解できれば、新しい運動(技能)を獲得するときの有益な情報になる。片麻痺などの症状が現れると、これまで無意識に行っていた動作が行うことが困難になる。リハビリテーション(以下、リハ)において、新たに運動を覚える脳の機能を最大限に利用できれば、不自由になった体をもう一度自由に動かせるように、助けることができると考えられる。

運動制御学習モデル

運動制御に関する研究は1980年代以降大きく進歩してきた。まず、腕の運動が計測され、水平面内の肩と肘の運動は、1つのピークを持つベル型で、ほぼ直線の軌道を描くことが示された¹⁾。また、運動生成の理論としては、筋肉のバネ特性に着目したラムダモデルや、終端位置制御モデルなどが提案された。しかし、終端位置制御モデルを確かめるために行った実験において、この仮説は提案者によって自ら否定されてしまった。終端位置制御モデルでは、運動指令は終端の位置であるため、このモデルが正しいのであれば、腕が動く前に手先を終端に強制的に動かしてしまえば、腕はその位置にとどまり続ける。しかし、腕の現在の位置を分からないように求心性の神経を切断し暗い部屋で実験を行ったにもかかわらず、運動開始前に

強制的に終端に動かされた腕は、始点の方向へいったん戻り始め、その途中で再び終端に戻る挙動を示した。この結果、脳は運動の終端位置を運動開始直後から一定の運動指令として用いているのではなく、運動の途中も時々刻々変化する指令を送っていると考えられるようになった。この実験以降、運動制御の研究の中心はどのように腕の軌道を計画しているかに移っていった。Bizziらは、腕の釣り合い位置を徐々に変化させる平衡軌道制御仮説を提案し²⁾、Flashらが、躍度最小モデルにより腕の軌道が予測できることと、その計画軌道を用いて実際の腕の運動が再現できることを示した³⁾。また、宇野らは、躍度最小モデルは腕や環境のダイナミクスに依存しないことから、トルク変化最小モデルを提案し、経路点を通る運動における軌道の非対称性なども再現できることを示した⁴⁾。これ以降も、終端誤差分散最小モデルなど、軌道を説明するモデルが提案されているが、すべての仮説は何らかの評価関数を最小化する問題を解くことにより軌道を計画している。一方、Todorovらは、軌道計画を必要としない最適フィードバック制御仮説を提案⁵⁾しているが、運動ごとに最適化問題を解く必要がある。

これらの背景を踏まえて、生体の持っている特性、すなわち、筋肉はバネ的な性質を持っていることや複数の筋肉が1つの関節トルクに関係していることから生じる釣り合いの位置(平衡位置)が存在すること、フィードバック制御とフィードフォワード制御が行われていることなどを考慮に入れることで、これまで提案されている制御理論を統合するモデルが考えられる(図参照)⁶⁾。さらに、終端位置制御仮説や平衡位置制御仮説のように運動と力を統一的に扱うことができる

2015年1月7日受稿

*1 本稿は第51回日本リハビリテーション医学会学術集会教育講演(2014年6月5日,名古屋)をまとめたものである。

*2 東京工業大学ソリューション研究機構/〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-J3-10

E-mail: koike@pi.titech.ac.jp

図 運動制御学習モデル

ため、単なる2点間の運動だけでなく、物体を持つ動作など環境との相互作用がある場合でも適応可能となる。また、脳は運動を生成する方法を誰にも教わることなく学習により獲得しているため、このモデルは、制御対象に関する事前知識も必要としない。

一方、制御の観点から、フィードフォワード制御を行っているとするならば、脳は制御対象の逆モデルを獲得する必要がある。逆モデルとは、制御対象の入出力が逆の関係になっているという意味であり、たとえば、制御対象を腕とすると、入力（筋活動）は出力（関節の角度や角速度）となるため、逆モデルでは、腕の状態（角度や角速度）を入力として、筋肉への運動指令（筋活動）を出力するモデルとなる。このようなモデルが脳内に存在すれば（フィードバック誤差学習などにより獲得）、望みの腕の状態が決まるとそれに必要な運動指令（筋活動）が直接計算できることになる⁷⁾。先に示した終端位置制御仮説では、入力としての腕の状態は終点（終端）の腕の姿勢のみであり、そこで安定化するために必要な運動指令を逆モデルにより計算する。しかし、運動指令は一定ではなく、運動の途中に変化していることがBizziらの実験により示されている。この実験結果から、計画される軌道が変化しているという解釈になったが、脳の中

に腕の運動を予測する部位があり、体性感覚が得られなくても脳内で現在の位置を推定していると考えられると、フィードバック制御が可能となる。このように、終端位置制御仮説に予測する機構を取り入れ、その情報を用いてフィードバック制御を行うことで、Bizziらの実験結果を説明できるようになる。フィードバック制御器も強化学習を用いることで、終端の誤差を報酬と考えて学習を行うことが可能となる。

リハへの応用

運動に関するリハは、新しい身体と脳の再学習だと考えることができる。脳の中で運動の位置が表現されている領域とそこでの情報表現などが分かれば、その情報を元に身体をロボットなどにより動かすことが可能となる。脳の出力である一次運動野の活動から筋肉の活動度や運動が推定できることから、将来、運動がどのように生成され、腕が制御されるのかの詳細に分かると、リハの過程で脳がどのように変化し、その変化がどのように行動に表れるのかを予測することが可能となる。

脳の計測方法については、装置の進歩や、信号処理技術の高度化により、小型で簡便な非侵襲計測装置が開発されると期待される。限定的ではあるが、脳波が

らでも手首関節の運動に関係する2つの筋肉の活動が推定できることが示されている。リハの途中で脳活動を解析することで、どの程度リハの効果があったかを定量的に示すことで、効率のよいリハが行えると期待される。

文 献

- 1) Abend W, Bizzi E, Morasso P : Human arm trajectory formation. *Brain* 1982 ; 105 : 331-348
- 2) Bizzi E, Accornero N, Chapple W, Hogan N : Posture control and trajectory formation during arm movement. *J Neurosci* 1984 ; 4 : 2738-2744
- 3) Flash T : The control of hand equilibrium trajectories in multi-joint arm movement. *Biol Cybern* 1987 ; 57 : 257-274
- 4) Uno Y, Kawato M, and Suzuki R : Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement : minimum torque-change model. *Biol Cybern* 1989 ; 61 : 89-101
- 5) Todorov E, Jordan M : Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nat Neurosci* 2002 ; 5 : 1226-1235
- 6) Kambara H, Kim K, Shin D, Sato M, Koike Y : Learning and generation of goal-directed arm reaching from scratch. *Neural Netw* 2009 ; 22 : 348-361
- 7) Kawato M : Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol* 1999 ; 9 : 718-727