

## スポーツバイオメカニクスにおける運動のモデル化の新しい視点

宮 地 力

### A new point of view for modeleng of human movement in sports biomechanics

Chikara MIYAJI

Simulation of movement is the active receach area of sports biomechanics. The method of simulation is based on the time sequences of torque which human generated. But these models lack the aspect of how the torque is controlled by human, or in another words, lack the higher level of torque control model. Without model of human intellectual infomation processing of movement, it is hard to model the movement skills and the movement acquisition.

So, the model of human movement must be constructed from the level of intellectual information processing model which control muscle activity, to the mechanical movement model which generated by these muscle activity. And this model which was simulated on the computer will show the complex system of human movement.

There are similar research area of the knowledge representation of movement, for example in the area of cognitive sciences, production system, and fuzzy controlled system. But it is not clear that which is the suitable model of movement knowledge representation. This knowledge representation will be the main research problem of the intellectual information processing of human movement.

Key words : Simulation, Human information processing

#### 1. はじめに

力学的には、人間の運動も物体と同じように、力が原因として引き起こされる運動である。人間の運動の場合、原因としての力は、筋収縮によるものである。そこで、バイオメカニクスの分野においても、人間の運動の原因としての力を探ることは、重要な意味を持つ。しかし、筋の発生する力は直接的には測定することが出来ない。そこで、人間を何らかのモデルに置き換えて、そこでの力を計算から求めるという方法が用いられている。例えば、2次元、3次元での剛体リンクモデルに人体を置き換えて各部分の剛体間のトルクや関節間力を計算により求める、という方法である。

このような、力やトルクを計算から求める手法は、バイオメカニクスの分野のみならず、リハビリテーション、人間工学等の分野で広く使われて

いる。

また、上記の方法とは逆に、人間のモデルの発生する力を与えて、そこから人間のモデルの運動を作り出す手法も研究されている。これは、「これこれの力が生じたときにどのような運動が起こるのか」という疑問に答えるものであり、いわゆるシミュレーションという手法である。例えば、Hatze<sup>3)</sup>は、シミュレーションの手法を使いながらトレーニングした結果、記録が向上したことを報告している、また、それ以外にも、数多くの運動のシミュレーションが試みられており、今後、実際のトレーニングへの応用も含めて、大変広がりのある分野である。

#### 2. 力学的シミュレーションの問題

力学的にみれば、人間の運動は関節に生じるト

Table. 1 知能ロボットの分類と現状 (白井, 井上, 1987)

作業環境	学習能力	学習能力なし	組み込み限定学習	自己学習
設定された環境		大部分の実用ロボット	一部実用化	不要
既知環境		実用化のため開発中	最も多く研究されている	学習の研究として模索中
未知環境		実現困難	基礎研究中	未着手

トルクの時間的変化で記述される。そこで、そのトルクや筋収縮の発生のタイミングや大きさを変化させることにより、運動をより最適なものにしていくという考え方が生まれる。

しかし、トルクや筋の興奮レベルはどのような方法で変化させるかについてのモデルは、ほとんどない。人間の作り出す力は1つ1つ独立ではない。例えば、垂直跳びで膝のトルクを大きくすることを考える。しかし、その結果として、跳躍高を大きくするよりは、全体の運動のバランスを崩し真上に跳び上がれなくなることは容易に予想できることである。つまり、1つ1つのトルクの全体の関係がひとつのまとまった運動を作り出していると考えられるからである。また、人間は、運動をするときに、どのようにトルクを時間的に変化させるか、というイメージでは運動をしていない。そこには、どのようにトルクを変化させるかに関しての、時間的、数値的なものではない表現が存在することが考えられる。つまり、人間が作り出すトルクの時間的な経過は、より上位のレベルでの運動のコントロールの結果である。そこで、人間の運動のシミュレーションにおいても、脳が受け持つ運動の知的情報処理も含めてのモデルを立てたシミュレーションが必要であろう。

### 3. 運動の知的情報処理の側面

このような、運動の知的情報処理的アプローチには、心理学、ロボット工学、アニメーション、制御工学などの広範な分野の研究にいくつか参考になるものがある。

#### 3.1. 心理学からのアプローチ

運動の知的情報処理の側面は、心理学的な研究対象でもある。工藤<sup>9)</sup>は Keele 等の考えをまとめながら、動作制御にはフィードバックと動作プログラムがあると述べている。動作プログラムは、本稿での運動の知的情報処理と規を一にするものと考えられよう。しかし、また、工藤は動作プロ

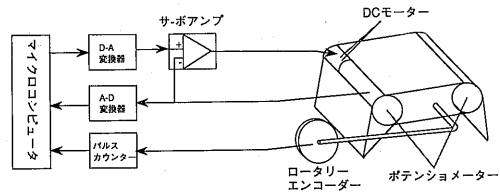


Fig. 1 System for the Experiment of Two leg Locomotion Robot. (銅谷, 1987)

グラムのための研究パラダイムが無いことにも言及している。

運動の知的情報処理の活動としてのシンボルの操作は、心理学の対象であるが、実際の人間の運動として力学的にどのようにして現われるかという問題は心理学の研究対象にはない。それが、動作プログラムの研究方法上の問題点であろう。

運動の知的情報処理と、それによって引き起こされる力学的な人間の運動までを含めたシミュレーションは、運動プログラムの新たな視点となると考えられる。

#### 3.2. 知能ロボットでの例

ロボット工学での知能ロボットは知的情報処理能力を組み込んだロボットである。白井, 井上<sup>12)</sup>は、知能ロボットの現状を Table 1 のようにまとめている。しかし、Table 1 の示すように、既知環境での組み込み限定学習などの研究が多く、人間の運動とはまだ直接には結びつかないようである。

銅谷<sup>2)</sup>は、Fig. 1 に示す簡単な二足歩行のロボットを作り、歩行のパターンを Fig. 2 のように設定した。そして、4つの角度と歩行リズムをパラメータとし、移動速度を評価関数にした時の、パラメータの最適値を求めている。最適値は多変数関数の最大値問題であるので、ここでは、パラメータを少しずつ変化させながら評価値を大きくして行く山登り法を用いている。そして、ロボットが、最

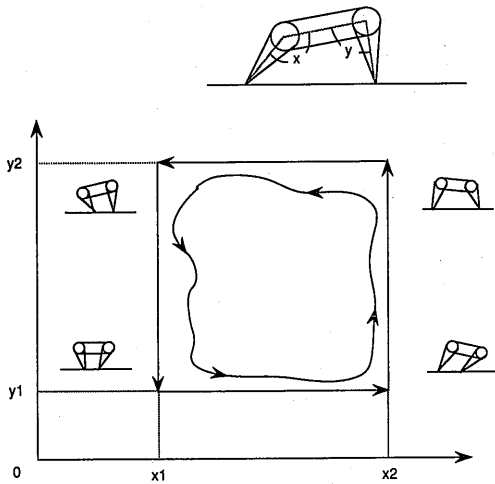


Fig. 2 Movement Pattern of Two leg Locomotion Robot. (銅谷, 1987)

適な運動を自己組織化する過程で、「すり歩き」,「腰すり歩き」などと呼べる多数の歩行パターンが見られたことを述べている。これは、運動の学習に関する興味深い例である。しかし、人間の運動の評価関数を定めることは、今後の難しい問題の一つである。

### 3.3. アニメーションでの例

アニメーションの分野で、Zeltzer<sup>14)</sup>は Task level animation というものを研究している。これは、アニメーションのキャラクタ自身が、自分がどう動くかという知識を持って1コマ1コマを作り出すというものである。Zeltzer は、Task level から必要なキャラクターの動きを導き出す方法として、Motor Problem Solving (MPS)を開発した。この MPS の概略を Fig. 3に示した。ここでは、ある task があると、それに関係した Skill を実行しようとする。Skill は Expectation Lattice として表現されており、1つの Skill を実行するにはその skill のもつ条件を満足していなければならない。それが、満たされていない時は、その条件にバインドされた他の Skill を実行しようとする。また、最終的な Skill は Local Motor Problem として実行される。このようにして、ある Task は Expectation Lattice のなかの後戻りの無い運動の連鎖となる。これが、運動の問題解決(MPS)である。これは、Newell と Simon<sup>10)</sup>の GeneralProb-

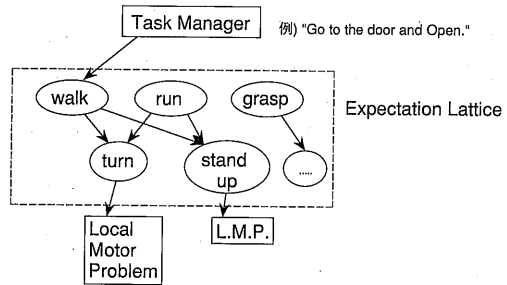


Fig. 3 Description of Motor Problem Solving. (Zeltzer, 1987)

lem Solving (GPS)を運動に応用したものと言える。

Zeltzer は、MPS と Cognitive Problem Solving の交互作用が運動の学習であるとしている。スポーツの場面での運動がどの程度の複雑さで MPS として現れるかは不明であるが、運動のモデル化としての参考になる。

### 3.4. 行動シミュレーションでの例

一人の運動のモデル化ではないがサッカーなどのゲームの場面への応用が考えられるモデルがある。丸一、所<sup>7)</sup>は、多くのオブジェクトとそのオブジェクトがプロダクションルールを持ち、並列的にメッセージをやりとりするようなプログラミングシステム、PANDORA を作成している。その中で、ニシンの群れとカマスの行動をシミュレーションしている。

ここでは、オブジェクトとしての一匹のニシンの行動のルールがプロダクションシステムとして記述される。これは、一匹の時は、どう行動するか、また、群れの時はどうするか、カマスがきたらどうするか、とすることが記述されている。そして、そのルールにしたがうニシンが複数存在する状況をシミュレーションする。

ここで、サッカーの一人の選手をオブジェクトとし、その選手のもつ知識をプロダクションルールとして表すことが出来れば、ゲームなどのシミュレーションに応用出来るのではないかと考えられる。

この場合の運動は、行動のレベルで記述されており、より細かい運動の記述ではない。

### 3.5. ファジィ制御での例

運動を、前述の、こうなったらこうするという if-then-else のプロダクションルールの集まりで

表される知識であると仮定しても、それは、人間の場合は正確に膝の角度が何度であればこうする、という知識であるとは考えられない。それは、おおよそこの位の時はというあいまいな量で記述されている、と考えられる。このようなあいまいな言語的規則で制御をおこなうシステムにファジィ制御がある。Fig. 4には Mamdani<sup>9)</sup>がスチームエンジンのファジィ制御を行なったときのシステムを、Fig. 5にはその制御の言語的規則を示す。これは、あいまいさをふくんだプロダクションルールの集まりである。運動の制御もこのような曖昧さをもったルールとして考えることができる。

#### 4. 運動の知的情報処理のモデルとシミュレーション

運動の知的情報処理のモデル化とは、人間が運動をする時に生じる人間の情報処理過程をモデル化することである。その、情報処理過程は、いくつかの階層構造になっていることが考えられる。もっとも上位の階層では、人間の行動のモデルとしてあらわせる。また、行動モデルの下位階層には、運動を実際におこなうときのいくつかの基本的な運動のまとまりごとのより下位の階層があり、それらを、運動のプログラムに従って実行して行

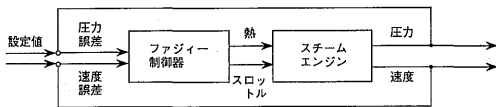


Fig. 4 Fuzzy Control System of Steam Engine. (Mamdani, 1974)

```

HEATER ALGORITHM
If PE = NB then if CPE = not (NB or NM) then HC = PB
or
If PE = NB or NM then if CPE = NS then HC = PM
or
If PE = NS then if CPE = PS or NO then HC = PM
or
If PE = NO then if CPE = PB or PM then HC = PM
.....

PB = Positive Big, PM = Positive Medium,
PS = Positive Small, PO = Positive Zero, N = Negative

PE = 圧力偏差
CPE = 圧力偏差の変化分
SE = 速度偏差
CSE = 速度偏差の変化分
HC = 供給熱量の変化分
TC = スロットル開度の変化分
    
```

Fig. 5 Linguistic Control Rule for Steam Engine. (Mamdani, 1974)

く運動実行部が考えられる。これは、例えば、計算機において、プログラムとそれをインタープリタが実行して行く過程などと類似のものである。そして、下位の運動の実行部分で実際に力学的な運動を引き起こす力やトルクが作り出され、現実の運動となって行く。

そこで、人間の運動のシミュレーションは、知的情報処理過程により、下位の身体各部に指令が下り、筋が力を発揮し、その力が原因となって力学的な人間の運動を作り出すという、有機的に総合されたものになる。このようなシミュレーションの分野は、認知科学、スポーツ力学、生理学のオーバーラップした分野と考えられる。

また、モデルは常に計算機上や実際のロボットの運動としてシミュレーションをおこない視覚的に表現することが、不可欠のものとする。そのように、視覚化されたとき、そのシミュレーションの結果を人間が見ることで、モデルが適切であるかどうか、などの判断することができる。

#### 5. 運動の知的情報処理のモデル化における問題点

運動の知的情報処理のモデル化とシミュレーションにおいて、いくつかの問題点が考えられる。

##### 5.1. モデルの妥当性の検討方法の問題

人間の知的情報処理のモデルはどのように検証されるのであろうか。物理的なモデルとことなり実験的にそれを確かめる方法がない。佐伯<sup>10)</sup>は認知科学はモデルの科学であると述べている。ここでは、どのようにもっともらしい形でモデル化して説明するかにかかっている、ということが重要であるとしている。つまり、どのようなモデルで矛盾なく多くの現象を説明できるかを重視している。

しかし、運動を研究する場合は、認知科学とは異なる点もある。それは、純粋に認知的な問題とは違い、運動の問題では、知的情報処理のモデルの結果が常に力学的な身体の運動として現われることである。シミュレーションによって作り出された人間の運動から、モデルの妥当性の検討が可能であると考えられるからである。

運動に関する知的情報処理はまだほとんど研究されてはいない。おおくのモデルが提案され、検証される必要があるであろう。

## 5.2. 運動の知識の表現方法の問題

人間の運動に関する知識、もしくは、運動を実行するための人間のもっているプログラムはどのような形で表現されるものなのであろうか。前述の Zeltzer では運動の情報処理のモデルとして Expectation Lattice のネットがあった。これが、Zeltzer のモデルでの運動の知識表現であるといえる。丸一、所の行動シミュレーションにおいては個々のオブジェクトのもつ知識はプロダクションシステムで表されている。村越<sup>9)</sup>は運動の知識表現を keele のようにプロダクションシステムによってあらわした時、そこに運動の階層性とフィードバックが必要であるとしている。

しかし、運動にはこうなったらこうするという if-then-else のプロダクションルールの集まりであらわされる宣言的知識以外に、こうやって次こうして、という手続き的なものも多い。これは、ロボット言語というロボットに対する命令の言語<sup>9)</sup>で言えば、動作記述的なレベルである。運動の知識表現に関し、宣言的知識と手続き的知識をいかにまとめるかという問題である。

また、人間の運動は高度に並列化されたものであると考えられる。知識表現のなかにいかに並列性を記述するか、と言う問題がある。パパート<sup>11)</sup>はお手玉の学習について、並列的に記述された方法で練習した場合と、逐次的に記述された方法と比較し、並列的な記述が格段に修得や修正が容易であったことを述べている。

また、運動の記述方法には全く違った方法もある。例えば、ダンス等の動きを記述するもので Rudolf Laban によるラバ記譜 (Laba Notation)<sup>4)</sup> と言うものがある。Badler と Smoliar<sup>11)</sup> は、このラバ記譜を、計算機上での人体の動きのシミュレートのためのデータとしてつかっている。しかし、ラバ記譜は記述的ではあるが問題解決的なものは提供していない。

人間の運動の知的情報処理をモデル化しシミュレーションを進めていく際には、どのようにその知識が表されているかが重要な解決する必要がある問題の一つである。

## 6. まとめ

現在バイオメカニクスの分野で運動のシミュレーションが盛んに行なわれるようになってきた。しかし、そのシミュレーションは人間の発揮す

ルクの時間的シーケンスを基にしており、より上位のトルクを制御する人間の知的情報処理の過程をモデル化したものではなかった。しかし、人間の運動の知的情報処理の過程をモデル化しなければ、運動の技術や運動の学習という分野の研究は困難であろう。

そこで、運動を、知的情報処理の過程から生理学的な筋活動、そして、筋活動によって生じる力学的な人体の運動、の有機的な関係としてモデル化し、それを計算機の上でシミュレーションすることによって、運動のもつ複雑な機構が明らかになると考えられる。

しかし、運動の知的情報処理での知識表現のモデルには、認知科学的な知識のモデル、プロダクションシステム、ファジィ制御などいくつかの例が示されたが、運動の表現に最適なモデル、そのモデルの検証の問題、運動の並列性の表現の問題等、今後の研究の課題であると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) Badler, N.I. and Smoliar, S.W.: Digital Representations of Human Movement, ACM Computing Surveys, 11-1: 19-38, 1979.
- 2) 銅谷賢治: 運動パターン自己組織化, 計測自動制御学会, 学術講演会予稿集, p 961, 1987.
- 3) Hatze, H.: A comprehensive model for human motion simulation and its application to the take-off phase of the long jump, J. biomechanics, 14: 135-142, 1981.
- 4) Hutchinson, A: Labanotation, Theatre Arts Books, New York, 1970.
- 5) 工藤孝幾: 動作制御の心理学研究, Jap. J. of Sports Sci. 8-5: 284-288, 1989.
- 6) Mamdani, E.H.: Applications of Fuzzy algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, 121-12: 1585-1588, 1974.
- 7) 丸一威雄, 所真理雄: 分散型知識処理に的したオブジェクト指向ルールベース・プログラミング, コンピュータソフトウェア, 5-4: 27-39, 1988.
- 8) Mujtaba, S and Goldman, R.: AL User's Manual, The Board of Trustees of the Leland Stanford Univ., 1982.  
金山裕, 坪内孝司訳: ロボット言語 AL, 総研出版, 1984.
- 9) 村越真: 手続きの獲得と意味の抽出—運動技能学習の2つの側面, 静岡大学教育学部研究報告 (人文・社会科学篇) 39:65-74, 1988.
- 10) Newell, A. and Simon, H.A.: Human Problem

Solveng, Printice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1972.

- 11) Papert, S.: MINDSTORMS--Children, Computers, and Powerfull Ideas, Basic Books, 奥村貴世子訳：マインドストーム，未来社 pp121-131, 1982.
- 12) 白井良明，井上博允：知能ロボット研究の展望  
—モデルベースト・ロボティクス，

日本ロボット学会誌5-6: 462-469, 1987.

- 13) 佐伯胖：認知科学とはいかなる科学か，知識と認知のソフトウェア，サイエンス社，別冊数理科学，1985:4, pp. 6-12.
- 14) Zeltzer, D.: Motor Problem Solving for Three Dimensional Animation, Proc. L'Imaginaire Numerique, 1987.