

解説

上肢運動のモデル化とシミュレーション

伊藤 宏 司*

1. はじめに

マラソン選手の流れるようなフォーム, 100 m 走者のダイナミックな動き, 楽器を奏でる微妙な手の動き, あるいは“能”, “ダンス”, “手話”といった身体による表現など, 私達の動作はじつに多様であり, その運動の巧みさははかり知れないものがある. 身体運動のシミュレーションとは, このような運動をコンピュータ上で模擬しようとするものである. そのためには, 身体の運動パターンを何らかの方法でコンピュータ内で生成する必要がある. ところが, 私達の筋骨格系は100以上の関節自由度をもつ非常に冗長なシステムになっている. すなわち, 私達の身体は運動目的を達成するのに必要な自由度に比べて, はるかに多くの運動学的冗長性を有する. たとえば, ドアの開閉では, 手先は円軌道に従って動かせばよく, 運動学的には1自由度である. これに対して, 肩, 肘, 手首からなる骨格系の自由度は, 合わせて7になる(手指の関節は無視する. これを加えると自由度はもっと多くなる). また, 各関節に付着して腕の運動に関与する筋群は, 少なく見積っても腕全体で20以上ある. したがって, 目的とする運動に対して, 取り得る身体各部位の運動パターンは無数にあることになる.¹⁾

このように, 身体のシミュレーションをコンピュータ上で実現するためには, 運動目的に対してどのように運動パターンを決めるかが課題になる. 本稿では, はじめに身体運動の基本となる運動学と動力学について簡単に述べ, 3章で巧みな運動

を実現している脳の機能構造を上肢の reaching 動作を例にとって概略を説明する. 4章では上肢運動のシミュレーション解析の一例を示す.

2. 身体の運動学と動力学

私達の骨格系は, 図1のように, 筋によって駆動される多数の関節からなるリンク機構としてみることができる. 私達は筋を収縮させることによって関節を回転させ, 手先や道具を作業空間内で位置決めする. したがって, 手先を目標位置にもっていくためには, それに対応して筋の長さや関節の角度を定める必要がある. このように, リンク機構の空間的關係を記述する問題を運動学 (kinematics) と呼ぶ. 運動学では, 位置, 速度, 加速度を変数として扱い, 時間とともに変化するリンク機構の幾何学的關係を解析する. また, 手先で物体を操作するためには, 筋力を制御して各関節に適切な力, トルクを発生させなければならない. このような, リンク機構の力学的關係を動的に解析する問題を動力学 (dynamics) と呼ぶ.¹⁾

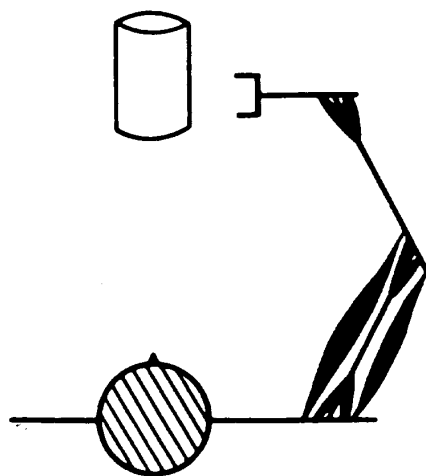


図1 筋骨格系

平成4年5月11日受付

*豊橋技術科学大学

〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

キーワード: Reaching 動作 (Reaching movement), 運動学 (Kinematics), 動力学 (Dynamics), 生体運動系 (Motor control system), 冗長自由度 (Redundant degree of freedom)

身体運動の解析やシミュレーションでは、つぎの四つの基本関係が重要である。

1) 順運動学 (direct kinematics)

身体各部位の関節角度と幾何学的なパラメータ (四肢の長さ, 関節位置) が与えられたとき, ある基準となる座標系に関する手先の位置・姿勢を求める問題である。一般に, 基準座標で表現した位置 x と関節角度 θ の関係は, 非線形関数によって

$$x = f(\theta) \quad (1)$$

のように書くことができる。

2) 逆運動学 (inverse kinematics)

基準座標系に関する手先の位置・姿勢, および幾何学的なパラメータが与えられたとき, 取り得る身体の姿勢, すなわち関節角度を求める問題で, (1)式を逆に解いて

$$\theta = f^{-1}(x) \quad (2)$$

を求める。この解は唯一に決まるとは限らない。すなわち, 目的とする運動に対して身体が冗長な自由度をもつ場合には, 何通りもの θ が得られることになり, 何か拘束条件を課さない限り, 身体の姿勢が決められないことになる。

3) 順動力学 (direct dynamics)

関節での力・トルクが与えられたとき, リンク機構がどのような運動 (変位, 速度, 加速度) をするかを求める問題である。このためには, 運動方程式と呼ばれる微分方程式を解かなければならない。

運動方程式の一般形は次式で与えられる¹⁾

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau \quad (3)$$

$M(\theta)$: $n \times n$ 慣性行列で正値対称行列

$h(\theta, \dot{\theta})$: 遠心力・コリオリ力を表わす n 次元ベクトル

$g(\theta)$: 重力項で n 次元ベクトル

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$: 関節の駆動力

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$: 関節角度変数

運動方程式はリンク数が多くなると, 非常に複雑な非線形微分方程式になる。また, 手先が対象物に接触したり拘束されたりしてリンク構造が変われば, 最初から式を立て直さなければならない。特に, 三次元運動の運動方程式を手計算で導出することは不可能に近い。したがって, 現在は, 計算機による運動方程式導出アルゴリズムが各種開発され, グラフィックスと組み合わせたプログラムが多数市販されている²⁾⁻⁴⁾

4) 逆動力学 (inverse dynamics)

関節角度の時間的な変化が与えられた場合, それを実現するのに必要な駆動力を求める問題で, (3)式に角度, 角速度, 角加速度を代入して, 右辺の τ を求めることになる。

以上の関係を示すと図2のようになる。私達はこれらの運動学的・力学的問題を解決して複雑な身体運動を実現している。

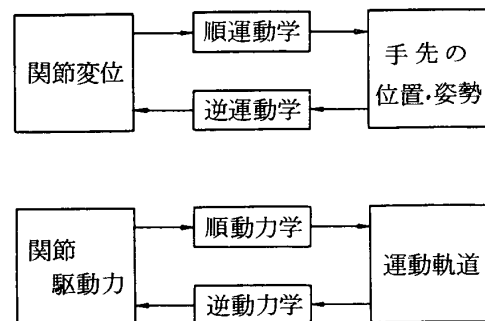


図2 身体運動の基本関係

3. 生体運動系の機能モジュール

次に, 身体運動を実現している脳の運動制御機構の機能的モデルについて見てみよう^{1),5),6)}

人間を含む高等動物は随意的に行動し運動する能力がきわめて高い。したがって, 運動が実際に筋活動のパターンとして出力される前に, かなり複雑な行動と運動のプログラミングが行われていなければならない。よく知られているように, 私達の大脳皮質には数多くの機能モジュールが分散して形成されている。運動制御に着目したモジュ

ール表現の概念モデルをreaching動作を例にとつて図3のように考える。

左右の網膜像から得られた視覚情報は、視覚野での処理の後、頭や眼球の動きに影響されない空間位置・速度表現(頭頂連合野),あるいは形・サイズといったパターン表現(側頭連合野)に変換される。一方、自己受容器からの体性感覚は、身体座標表現(関節角度など)として感覚マップ上にコードされる。そして、空間マップ上の手先位置と感覚マップ上の身体座標の間が座標変換で結ばれる。そこでは、手先と他の身体部位の関係や手先と対象物との関係などが表現される。事実、自分の手が見えるかどうかで、手先の位置決め精度が大きく変化することが確かめられている⁷⁾このマッピングは先に述べた順運動学・逆運動学に対応する。

運動プランのモジュールでは、空間マップ、感覚マップなどの情報に基づいて、運動目標を達成するための運動系列が生成されるとともに、個々の運動を実現する上での評価基準が設定される。

一方、運動マップでは、与えられた評価に基づいて運動系列から時空間運動パターンが生成される。この運動パターンは身体全体に対して直接生成されるとは考え難い。むしろ、ある作業空間を、三次元空間内、あるいは仮想的な空間(上肢のreaching動作では手先空間)内に設定して、その空間上に生成されると考えるのが妥当であろう。運動目標・評価を拘束条件として、この抽象的な作業空間を定め、運動パターンを生成するメカニズム・方法を見いだすことが、運動をシミュレーションする上で重要な課題になる。

次に、生成された運動パターンは、身体座標空間(関節角度・筋の長さ)へマッピングされる。このマッピングは逆運動学、逆動力学に対応し、この変換を定めるためには、さまざまな自由度拘束が必要である。さらに、身体座標での運動パターンは運動指令として脊髄レベルのサーボ機構に送られるとともに、順運動学・順動力学モデルで内部的にシミュレーションされ、運動マップあるいは身体座標空間へフィードバックされる。

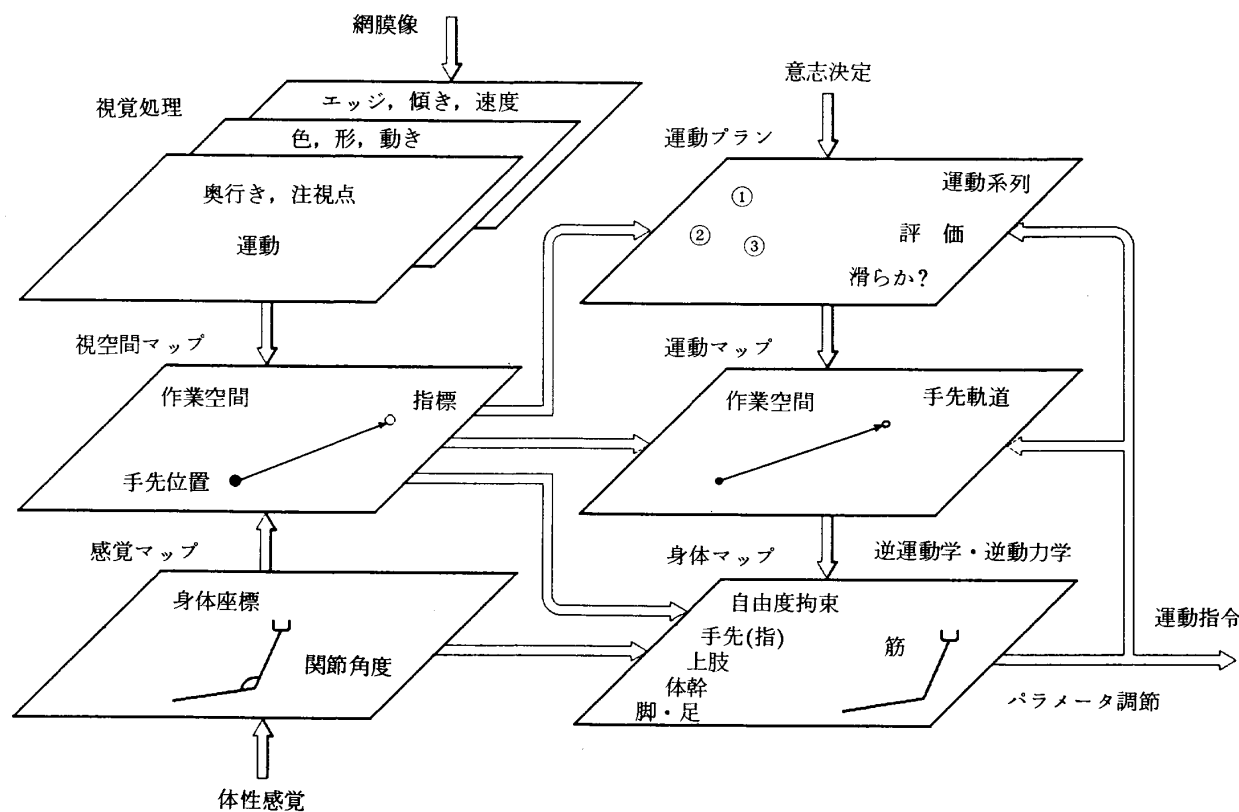


図3 Reaching動作の機能モデル
(文献5)より改変)

4. 分散的逆運動学マッピング

ここでは、モジュール間のマッピング構成法の一例として、仮想アームというサブシステム概念による作業空間から身体座標空間への並列・分散的なマッピングについて述べる。詳細は文献(8)を参照されたい。

図4のように上肢の関節位置やリンク上の点に手先を持つような仮想的なアームを定義し、上肢を複数の仮想アームの集合体としてとらえる。上肢の関節空間の運動(姿勢)は、仮想手先の運動の集合として表現されることになり、作業空間と関節空間との間の中間表現を形成する。

4.1 仮想アームの逆運動学問題

仮想アームの逆運動学問題は、上肢の関節自由度、仮想アームの数、仮想手先の位置に依存して、

- ①すべての仮想手先の目標変位を満足しても上肢の関節角度が不定となる冗長な場合
- ②すべての目標変位を満足する上肢の関節角度が存在しない過拘束な場合

③冗長な部分と過拘束な部分が共存する特異な場合

の三つに分類できる。そして、冗長な部分は関節角変位のノルム最小、過拘束な部分は手先の2乗誤差最小という評価関数を定義すれば、仮想アームのヤコビ行列の最大階数分解に基づいて、その評価のもとでの最適な逆運動学解を得ることができる。

4.2 ニューラルネットによる分散的軌道生成

各仮想アームに対応したサブシステムをニューラルネットで構成し、サブシステム間の協調により仮想アームの逆運動学解を分散的に計算することができる(図5参照)。この方法は、各仮想アームの順運動学を誤差逆伝播型ニューラルネットで独立して学習させ、その後、各サブシステムを相互結合することにより上肢の姿勢(関節角度)をエネルギー最小化の原理に基づいて計算するというものである。この手法は次のような特徴をもつ。

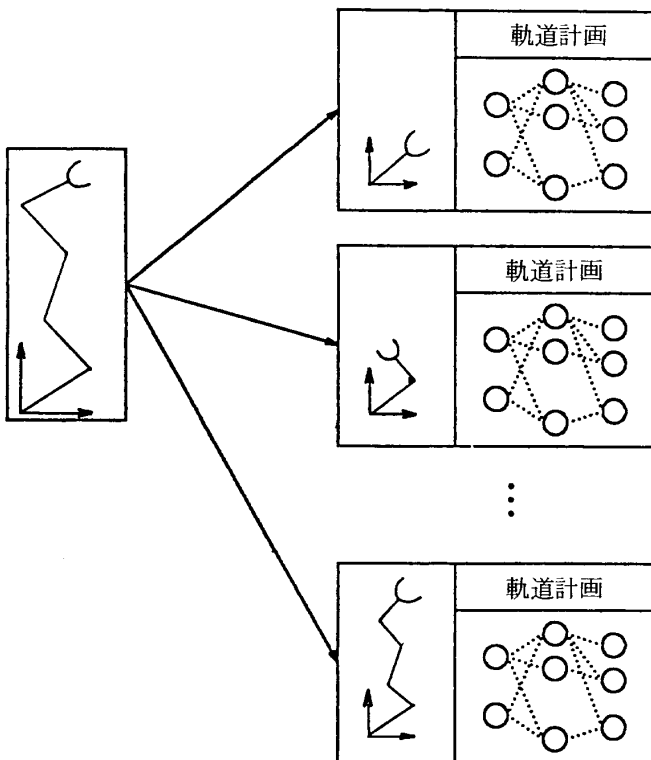


図4 仮想アーム¹²⁾

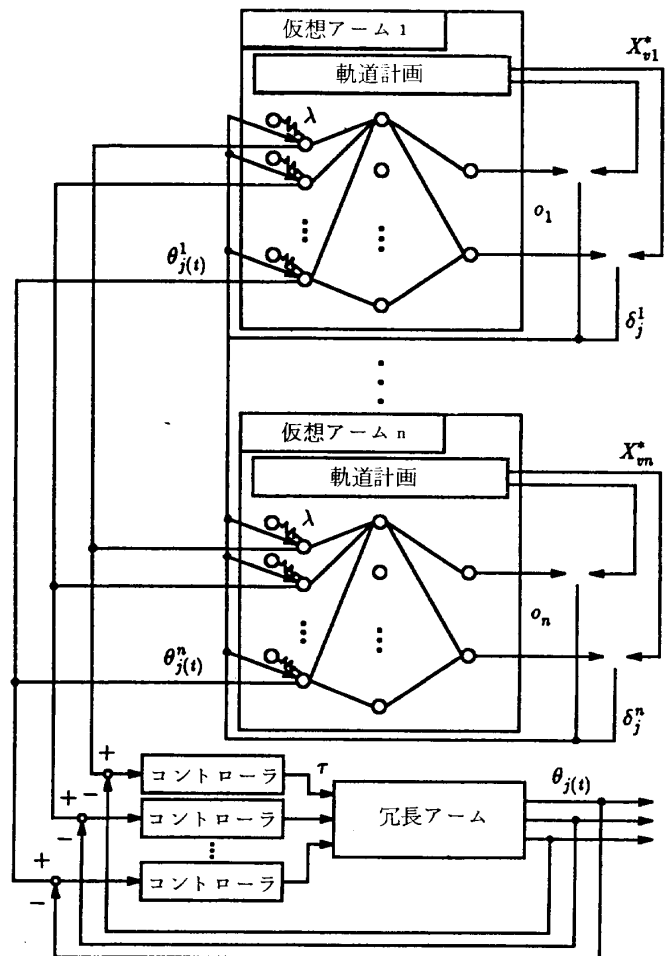


図5 ニューラルネットによる分散的軌道生成¹²⁾

- ①各サブシステムは完全に自律的に動作する
- ②仮想アームの運動学を学習的に獲得できるため環境変化に適応できる
- ③仮想アーム設定に伴うすべての運動学的条件に対応できる
- ④仮想手先の目標位置は各サブシステムで独立に計画でき、上肢の関節角度を考慮する必要はない

また、仮想アームは上肢の姿勢を作業空間上で表現できるため、障害物回避のように環境との相互作用を考慮する必要がある運動を作業空間のみで計画することができる。すなわち、各仮想手先のまわりの局所的な情報のみを利用して仮想手先ごとに独立に目標軌道を計画し、それらをニューラルネットにより統合することで上肢の運動軌道を得る。この方法は目標軌道の計画と逆運動学計算を各サブシステムで、並列・分散的に実行することが可能である。

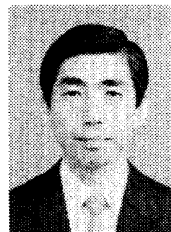
5. あとがき

本稿では、身体運動のシミュレーションの基本となる運動学と動力学について述べ、運動パターンの生成には自由度拘束が重要であることを指摘した。次に、身体運動を実現している生体の運動制御系について上肢の *reaching* 動作を例にとって、その機能モジュールの概要を述べた。さらに、逆運動学マッピングの解析例として仮想アーム概念に基づいたシミュレーションを示した。

今後、コンピュータの能力が向上するにつれて、多様な運動シミュレーションを実時間で実行することが可能になる。しかしながら、シミュレーションを単にアニメーションに終わらせないためには、システムの利用者が身体運動について十分な知識と判断力を有することがますます重要になってくると思われる。

参考文献

- 1) 伊藤宏司・伊藤正美：生体とロボットにおける運動制御，計測自動制御学会 (1991)
- 2) 伊藤宏司・横山尚之・辻敏夫：三次元運動解析システムと束縛動作への応用，バイオメカニズム，10, pp.119-128 (1990)
又は，伊藤宏司・黒瀬靖郎：3次元身体運動動的解析支援システム，スポーツ科学，8, pp.185-193 (1987)
- 3) 増田隆広，二川暁美，有本卓，宮崎文夫：アッペル法による閉ループ力学系の運動解析，日本ロボット学会誌，4-1, pp.9-15 (1986)
- 4) 川崎晴久：ロボットアームの動力学計算法，計測と制御，25-1, pp.23-29 (1986)
- 5) M. Jeannerod: The representation of the goal of an action and its role in the control of goal-directed movements, pp.352-368, in "Computational Neuroscience" Edited by E. L. Schwartz, The MIT Press (1990)
- 6) 丹治順：行動と運動のプログラミング，文部省科研重点領域研究「脳の高次機能の計算論的および実験的研究」ニュースレター，No.7 (1991)
- 7) 笠井健，山崎興八州：運動制御と空間知覚，第3回生体・生理工学シンポジウム論文集，pp.215-218 (1988)
- 8) 辻敏夫，中山聖也，伊藤宏司：ニューラルネットを用いた冗長マニピュレータの分散的軌道生成，第1回重点領域研究「自律分散システム」全体講演会論文集，pp.89-94 (1991)



伊藤宏司(いとう こうじ)1969年，名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了，1970年名古屋大学工学部自動制御研究施設助手，1979年広島大学工学部第2類(電気系)助教授。1992年4月より豊橋技術科学大学情報工学系教授。生体運動制御，ロボティクス，マンマシン・インタフェースの研究に従事。電気学会，バイオメカニズム学会論文賞受賞。計測自動制御学会，電気学会，日本ロボット学会，電子情報通信学会，日本ME学会，IEEEなどの会員(工学博士)。