

ロボティクスシリーズ 18

身体運動とロボティクス

工学博士 川村 貞夫 編著
博士(工学) 小澤 隆太
博士(工学) 塩澤 成弘
博士(学術) 吉岡 伸輔 共著
博士(工学) 伊坂 忠夫
博士(工学) 平井 宏明
工学博士 宮崎 文夫

コロナ社

ロボティクスシリーズ編集委員会

編集委員長 有本 卓 (立命館大学)

幹 事 川村貞夫 (立命館大学)

編 集 委 員 石井 明 (立命館大学)

(五十音順) 手嶋教之 (立命館大学)

渡部 透 (立命館大学)

(2009 年 1 月現在)

刊行のことば

本シリーズは、1996年、わが国の大学で初めてロボティクス学科が設立された機会に企画された。それからほぼ10年を経て、卒業生を順次社会に送り出し、博士課程の卒業生も輩出するに及んで、執筆予定の教員方からの脱稿が始まり、出版にこぎつけることとなった。

この10年は、しかし、待つ必要があった。工学部の伝統的な学科群とは異なり、ロボティクス学科の設立は、当時、世界初の試みであった。教育は手探りで始まり、実験的であった。試行錯誤を繰り返して得た経験が必要だった。教える前に書いたテキストではなく、何回かの講義、テストによる理解度の確認、演習や実習、実験を通じて練り上げるプロセスが必要であった。各巻の講述内容にも改訂と洗練を加え、各章、各節の取捨選択も必要だった。ロボティクス教育は、電気工学や機械工学といった単独の科学技術体系を学ぶ伝統的な教育法と違い、二つの専門（T型）を飛び越えて、電気電子工学、機械工学、計算機科学の三つの専門（ π 型）にまたがって基礎を学ばせ、その上にロボティクスという物づくりを指向する工学技術を教授する必要があった。もっとたいへんなことに、2000年を迎えると、パーソナル利用を指向する新しいさまざまなロボットが誕生するに及び、本来は人工知能が目指していた“人間の知性の機械による実現”がむしろロボティクスの直接の目標となった。そして、ロボティクス教育は単なる物づくりの科学技術から、知性の深い理解へと視野を広げつつ、新たな科学技術体系に向かう一歩を踏み出したのである。

本シリーズは、しかし、新しいロボティクスを視野に入れつつも、ロボットを含めたもっと広いメカトロニクス技術の基礎教育コースに必要な科目をそろえる当初の主旨は残した。三つの専門にまたがる π 型技術者を育てるとき、広くてもそれぞれが浅くなりがちである。しかし、各巻とも、ロボティクスに

ii 刊 行 の こ と ば

直接的にかかわり始めた章や節では、技術深度が格段に増すことに学生諸君も、そして読者諸兄も気づかれよう。恐らく、工学部の伝統的な電気工学，機械工学の学生諸君や，情報理工学部の諸君にとっても，本シリーズによってそれぞれの科学技術体系がロボティクスに焦点を結ぶときの意味を知れば，工学の面白さ，深さ，広がり，といった科学技術の醍醐味が体感できると思う。本シリーズによって幅の広いエンジニアになるための素養を獲得されんことを期待している。

2005年9月

編集委員長 有本 卓

ま え が き

ロボティクスは、学問としていまだ萌芽的發展段階にある。センサ、アクチュエータ、コンピュータの統合体として、自律的機能を生み出す原理の解明は、システム統合化の視点において、ようやくハード的にも探究できる状況となりつつある。ロボットは、人間や生物の運動・機能・知能から刺激を受け、その人工的実現を探究してきた。その中でも人間の身体運動は、ロボットの実現方法のアイデアが内在しており、つねにロボット研究者の強い興味の対象であった。一方、人間の身体運動の科学やスポーツ競技のための科学は、スポーツ科学、バイオメカニクス、リハビリテーション、医療・福祉等のさまざまな分野にまたがって、その科学と技術が研究されてきた。1980年代からロボットや人体に共通する多リンク構造の力学と制御に関する研究がロボティクス分野で発展し、その成果は身体運動科学に関わる分野でも広く利用されてきた。

近年、筋骨格構造のロボットやシミュレータが開発され、身体運動科学とロボティクスは、以前にも増して相互に刺激し合いながら発達してきている。特に、エネルギー効率の高い運動、しなやかで美しい運動、複雑な制約条件を満足する運動等の運動の巧みさについては、両分野からの研究が活発に行われている。しかし、両方の学問分野はいまだ發展段階であるので、体系的・網羅的なテキストとすることは困難と思われる。さらに、未解明な身体運動の部分に関して、教科書として既成概念のみを固定化させてしまうことに筆者らは慎重でありたいと願う。そこで、本書では、以下の内容とした。

- (1) ロボットと身体に関連する運動の計測と解析法についての説明
- (2) スポーツ科学・運動科学からのアプローチによる運動の巧みさ研究紹介
- (3) ロボティクスからのアプローチによる運動の巧みさ研究紹介

以上のような基本的な考え方に立脚し、1章「身体運動科学とロボティクス」

を川村貞夫（立命館大学）が、2章「運動学的モデルと計測」を小澤隆太（明治大学）が、3章「身体運動の力学的計測と解析」を塩澤成弘（立命館大学）が、4章「筋骨格モデルを用いた動作解析法」を吉岡伸輔（東京大学）が、5章「身体運動の巧みさの解析」を伊坂忠夫（立命館大学）が、6章「センシングと運動の協調」を平井宏明（大阪大学）が、7章「運動学習と巧みさの発達」を宮崎文夫（大阪大学名誉教授）が担当した。1～3章までは基礎的な内容のため各章に章末問題を付けた。4～7章は専門的な内容や研究トピックスの中から本書の目的とする内容が理解できる構成とした。そのため章末問題は付けていない。

本書では「人間」の表現に、「人」や「ヒト」も用いている。一般には、人間を他の生物と同様に取り扱う場合には「ヒト」が用いられる。ただし、前述のように、身体運動科学とロボティクスは発展段階にあるので、本書では著者の判断として、統一した表現としていない。

本書は、ロボット研究者を目指す学生、院生、研究者に対して、身体運動の巧みさの研究に関する情報を提供し、また一方でスポーツ科学・バイオメカニクスの身体運動科学の研究者をめざす学生、院生、研究者にロボティクス分野からの情報提供となり、両分野に新しい成果を生み出す一助になればと期待したい。紙面の制約のみならず、筆者らの浅学非才から、多くの不十分な点を含んでいると思われる。これらの点に関しては、今後多くのご指摘を賜りたいと思っている。

2019年3月

川村 貞夫

目 次

1. 身体運動科学とロボティクス

1.1	身体運動科学とロボティクスの歴史	1
1.2	多関節構造体の運動解析方法 —形の問題と動きの問題—	3
1.3	運動制御 —フィードバック制御とフィードフォワード制御—	4
1.4	身体運動の特徴	5
1.4.1	冗長多関節構造	5
1.4.2	筋配置構造	6
1.4.3	粘弾性変化	7
1.5	多関節構造体の特徴 —特異姿勢—	8
1.6	身体運動をロボティクスの視点で考える	9
1.6.1	ドアまで近づきドアノブをつかむ動作	9
1.6.2	指合わせ動作	11
1.7	モデル化	13
	章末問題	14

2. 運動学的モデルと計測

2.1	身体の構造とそのモデル化	15
2.1.1	身体 の 分 節	16
2.1.2	関節の動きの表現	17
2.1.3	リンクの動きの表現	23
2.2	計測システム	26

2.2.1 計測システム	26
2.2.2 関節角の推定法	30
章末問題	31

3. 身体運動の力学的計測と解析

3.1 力の計測方法	32
3.1.1 ロードセル (力センサ)	32
3.1.2 床反力計	34
3.1.3 筋電図	36
3.1.4 加速度センサ	40
3.2 身体運動の力学	41
3.2.1 骨格筋	41
3.2.2 身体運動の力学モデル	42
3.2.3 単関節運動の静力学	42
3.2.4 単関節運動の動力学	46
3.2.5 多関節運動の動力学	48
3.3 身体運動の解析方法	53
章末問題	55

4. 筋骨格モデルを用いた動作解析法

4.1 逆動力学を用いた筋張力の推定法	57
4.1.1 解析の流れ	58
4.1.2 剛体リンクモデルと筋骨格モデル	58
4.1.3 筋骨格モデルのパラメータ	60
4.1.4 数値最適化計算と評価関数	62
4.1.5 計算時間	65

4.2 順動力学を用いた筋張力の推定法	66
4.2.1 解析の流れ	66
4.2.2 筋骨格モデル	67
4.2.3 数値最適化計算と評価関数	68
4.2.4 コンピュータの性能の向上と筋骨格モデルの複雑化	70
4.2.5 実際の動作解析例	72

5. 身体運動の巧みさの解析

5.1 しなやかな動作（日本舞踊）	76
5.1.1 運動学的評価	77
5.1.2 筋電図による拮抗筋の共収縮評価	79
5.2 力強い動作（ウエイトリフティング）	82
5.2.1 バーベルの軌跡	82
5.2.2 床反力と筋電図の左右対称性	85
5.2.3 リフティングスキルとエネルギー転移	87

6. センシングと運動の協調

6.1 センシングの二つの役割	91
6.2 センシングと運動パフォーマンス	93
6.3 身体運動の協調	96
6.3.1 ベルンシュタイン問題	96
6.3.2 ダイナミックシステムズアプローチ	98
6.3.3 運動リズム・動作タイミング	99
6.4 運動スキルの工学的実現	99
6.4.1 ジャグリングの運動スキル	99
6.4.2 運動リズムの生成	101

6.4.3	ロボット実験	103
-------	--------	-----

7. 運動学習と巧みさの発達

7.1	運動スキルの分類	108
7.1.1	タスクに基づいた分類	108
7.1.2	運動と認知に着目した分類	108
7.1.3	環境の予測性のレベルに基づいた分類	108
7.2	スキルを実現するための情報処理	109
7.2.1	脳の中枢神経系でなされる情報処理	109
7.2.2	閉ループと反応の遅れ	110
7.2.3	反応の遅れを克服するための予測	111
7.2.4	GMP とスキーマ	112
7.3	巧みな運動の学習	113
7.3.1	学習によるスキルの変化	114
7.3.2	コーチング	114
7.4	ロボットによる卓球タスクの学習	116
7.4.1	ロボット本体と計測制御システム	116
7.4.2	卓球タスクのためのスキル	118
7.4.3	注意の操作に関する教示	118
7.4.4	スキーマ（入出力マップ）の学習	119
7.4.5	ラケットの操作スキルを習得するための部分追加練習	121
7.4.6	卓球タスクの動作スキルの学習	122
7.4.7	ロボットによる卓球タスク	123
7.4.8	ヒトとロボットの卓球ラリー	125
	引用・参考文献	127
	章末問題解答	131
	索引	133

1

身体運動科学と ロボティクス

身体運動の科学は、医学、スポーツ科学等の生体を対象とする分野での研究と理解されることが多いかもしれない。病気を治す目的やスポーツ競技成績を向上させる目的などのために、身体を科学することが必要となる。これらの目的とはおそらく無関係に、人間の身体運動の巧みさや美しさに魅せられて、身体を深く観察し、絵画や彫像によって表現することは古来より行われてきた。

現在、身体運動の科学は、人間の運動と関わる諸科学に広がっている。例えば、DNA 解析などの生命科学研究分野にも広がっている。本書では、このようなミクロ的な視点での身体運動科学よりも、マクロ的視点での体幹、各関節、各筋肉の運動に関する身体運動科学を対象とする。

身体には多くの関節と筋肉が存在し、その使い方によってきわめて効果的・効率的な運動を生み出すことができる。このような身体運動の特徴には未解決な問題が多く、今後の研究成果によって、人間を深く理解すると同時に、医学、リハビリテーション学、スポーツ科学等の分野にとって大きな成果が得られることはいうまでもない。これとは別に、本書の以下では身体運動科学が、ロボティクス（ロボット学）といかに関連し、両者が連携または一体化して研究が推進されることを説明しよう。

1.1 身体運動科学とロボティクスの歴史

マクロ的視点での身体運動を考える際に、身体運動科学はロボティクスに強

2 1. 身体運動科学とロボティクス

いつながりを持つ，または，ロボティクス分野の中に身体運動科学を含んでいるともいえる。もともと，ロボット研究の始まりには大きく分けて，「人間と同じような機能・形態の人工物の創造」，「人間の作業の代替機能の実現」の二つが想定される。前者は人間の身体運動と深く関わり，人間のような形態で，人間のような機能を有する人工物を，どのように実現するかがロボティクスとしての問題となる。この問題に対して，現在までに多くのロボットが開発されてきた。一方，形態は異なっても，人間と同様の機能を果たすロボットも作られてきた。例えば，食品の製造装置開発の過程を見ると，まず初めに熟練作業者の手練の早業を，装置開発者が注意深く観察し，その熟練者の運動を科学し，熟練作業の本質を明らかにする。つぎに，その機能の本質を，利用可能な要素やシステムを用いて製造装置を開発する場合が多い。最終的に機械システムの形態は，人間とは異なる場合が多い。このような場合にも，身体運動を科学することが研究開発の始まりとなる。このような過程は，身体運動科学からロボティクスへの貢献となっている。

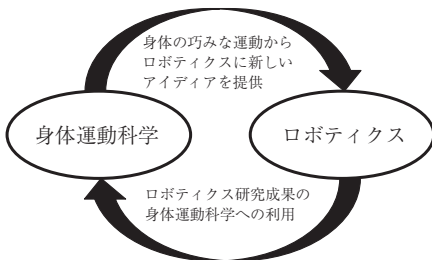


図 1.1 身体運動科学とロボティクスの関係

の特徴は，ロボットのニーズがあって研究が加速し，その結果として身体運動科学分野にも利用されるようになった。これらの関係は図 1.1 にまとめられる^{1)~5)†}。

一方，ロボティクスから身体運動科学への貢献も大きい。ロボット研究では人間と同様の形態や機能を実現するので，ロボット研究によって得られた解析方法，計測方法，モデル化法等は，身体運動科学にとっても有用な手段を与えてくれる。例えば，多関節構造体の運動方程式やそ

† 肩付きの数字は，巻末の引用・参考文献を示す。

1.2 多関節構造体の運動解析方法

—形の問題と動きの問題—

多関節構造の身体運動を解析する場合、二つの問題に分けて考えることができる。一つは“形の問題”あり、もう一つは“動きの問題”である。形の問題を考える際には、その身体の形状をどのように表現するか、その形の意味は何かを考える。したがって、位置や姿勢を表現するための座標系、座標系間の変換等が必要となる。形状の時間変化を考える場合もあるが、その運動がどのような力やトルクで生成されるかは考えない。このようなおもに形状を科学する分野をロボティクスやバイオメカニクスでは**運動学** (kinematics) と呼ぶ。この運動学では、幾何学、線形代数学等が有用である。また具体的な計測値としては、身体やロボットの腕の長さ (ロボットのリンク長さ) および関節角度が情報として必要となる。

つぎに、作用する力やトルクに対して運動がどのように作られるかの動きの問題を考える分野が必要となる。どのような速度パターンで運動するかは、ロボット作業の成否、スポーツ競技のパフォーマンスに大きく関係する。このような動きを科学するためには、運動の速度、加速度等と力・トルクの関係を考える必要がある、一般に運動方程式を利用する。その中では、各リンクの質量、慣性モーメントや力、トルクが含まれる。このような動きを科学する分野をロボティクスでは**動力学** (dynamics)、バイオメカニクスでは**運動力学** (kinetics) と呼ぶ[†]。この動力学 (運動力学) では、運動方程式は時間についての微分方程式で表現され、数学における解析学が重要となる。

[†] 専門分野によって、利用する専門用語が異なる場合がある。ロボティクスでは、先に述べたように、座標変換や微小変化の関係は、運動学と呼び、入力に対する運動の様子を表す関係を動力学と用言する。一方、バイオメカニクス分野では、運動学については同様であるが、上記の動力学を運動力学と呼んでいる。

1.3 運動制御

—フィードバック制御とフィードフォワード制御—

ロボットや身体の多関節構造体の形の記述と動きの記述が可能となり、つぎに考えるべきことは、運動をどのように制御するかである。一般に運動制御として、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) がある。

フィードバック制御では、センサから信号を脳にフィードバックして、なんらかの状態を認知し、アクチュエータに入力を与える。例えば、ロボットの関節に角度センサが搭載され、コンピュータのサンプリングタイムごとに目標角度と実際の角度の偏差を認知して、その偏差を小さくするように電動モータに入力信号が送られることなどが、この場合に相当する。また、人間では子供がお手本の字を見ながら筆を動かす場合はフィードバック制御となる。すなわち、人間は目標とする字から自分の筆先が離れることを視覚で認識するとその偏差量を小さくして目標の字に近づける働きをしている。このようにフィードバック制御では、目標位置が途中で変更されても、視覚等のセンサで追従することが可能である。

しかし、運動が高速になるにしたがって、フィードバック制御ができない状況が生まれる。センサで計測し、コンピュータで計算し、アクチュエータで駆動させるためには一定の時間が必要であり、要求される運動のスピードが速くなるとフィードバック制御は機能せず、いわゆる不安定な状況が発生する⁶⁾。このような場合に有効な方法が、フィードフォワード制御である。フィードフォワード制御では、各サンプリングタイムでセンサからの信号に基づく制御入力計算は行わず、運動開始時点にあらかじめ決めた制御入力をアクチュエータに与える。ロボットを高速で高精度に目標運動に追従させるためには、フィードバック入力にフィードフォワード入力を加えることがよく知られている。

また、人間の書字動作でも、高速になるとフィードフォワード制御に変わる。したがって、字を書き終わるまで、途中の変更ができない。他の多くのスポー

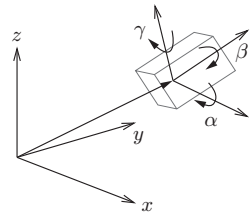
ツにおいても、高速運動を行う場合には同様であり、運動途中で変化することはできない。このような人間の特性がスポーツ競技では巧妙に考慮されて研究されている。

1.4 身体運動の特徴

1.4.1 冗長多関節構造

身体運動の特徴として、多関節構造とその冗長性が挙げられる。身体は多くの関節を持つ構造を有している。通常、剛体の力学モデルでは、剛体の位置と姿勢を決定するために、**図 1.2**に見られるように位置 (position) (x, y, z) と姿勢角 (orientation) (α, β, γ) の合計 6 変数が必要となる。

このように物体の運動を規定する変数を自由度 (degree of freedom) と呼ぶ。これに対して、ロボティクスでは関節数を自由度と表現する。したがって、「6 自由度以上の 7 自由度ロボット」等の表現を利用し、冗長関節を有するロボットの研究も行われてきた⁷⁾。



ここでは姿勢の表現の詳細を記述していないので、詳細は他の成書を参考のこと

図 1.2 剛体の自由度

人間の腕の自由度は 7 自由度と考えられる。これをつぎのように確認する。**図 1.3**のように、人間の肩の位置は固定されているとする。この場合、肩関節、肘関節、手首関節を腕と考え、手指は対象としない。肩関節には 3 自由度、肘関節には 1 自由度、手首関節には 3 自由度が存在する。合計で 7 自由度となる。先に述べたように、空間内の対象物体の位置と姿勢を決定するためには、6 自由度 (6 関節) あれば十分であり、7 自由度は 1 自由度冗長となる。この事実にはつぎのようにしても確認できる。任意の位置と姿勢に置かれた対象物体を把持する。その際、**図 1.4**に見られるように、対象物体の位置と姿勢を変化せずに、肘の位置を動かすことができる。この 1 自由度が冗長となっている。

—— 編著者略歴 ——

1981年 大阪大学基礎工学部生物工学科卒業
1983年 大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了（物理系専攻機械工学分野）
1986年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了（機械工学専攻）
工学博士
1986年 大阪大学助手
1987年 立命館大学助教授
1995年 立命館大学教授
現在に至る

身体運動とロボティクス
Body Motion and Robotics

© Sadao Kawamura 2019

2019年5月22日 初版第1刷発行

検印省略

編著者 かわむらさだお
川村貞夫
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04529-1 C3353 Printed in Japan

(大井)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。