

シリーズ システム・制御のニューフロンティア C-1

# 身体性知能とシステム・制御

大脇 大  
福原 洸 共著  
増田 容一

コロナ社

---

「シリーズ システム・制御のニューフロンティア」編集委員会

委員長 永原正章 (広島大学)  
委員 河島茂生 (青山学院大学)  
(五十音順) 谷口忠大 (京都大学)  
望山 洋 (筑波大学)

---

(2025 年 8 月現在)

## シリーズ刊行のことば

21世紀も四半世紀を終え、人工知能やロボティクス、通信ネットワークなどの科学技術はかつてない速度で進化を続けています。これらの情報技術の爆発的な発展とともに、地球規模での自然環境の激変や社会構造の多様化と複雑化は、我々が直面する課題を大きく変容させました。このような状況下において、システム・制御の学問は、新たなフロンティアを開拓し続けています。

前世紀に発展した古典的なシステム・制御理論は、おもに物理法則に基づくモデル化と解析・設計を中心として発展してきました。しかし、現代社会におけるシステムは、人間、社会、経済、環境など、多様な要素が複雑に絡み合い、物理モデルのみに立脚した古典的手法では捉えきれない側面を多く持ちます。

本「シリーズ システム・制御のニューフロンティア」は、このような認識に基づき、既存の枠組みを超えた新しいシステム・制御の学問体系を構築することを目的としています。具体的には、以下の四つのカテゴリにおいて、最新の研究成果と将来展望を提示します。

### 【カテゴリ A：新しいシステム・制御の基礎理論】

サイバーフィジカルシステムや人間社会の中でのシステムなど、現代的なシステムを扱うための新たな基礎理論の枠組みを展開します。

### 【カテゴリ B：システムの知能】

人工知能とシステム制御理論が融合した新しいシステム設計論を探求します。

### 【カテゴリ C：システムの身体性】

身体と環境のダイナミクスとそれに基づく知能の構成を目指し、物理世界と相互作用するシステムの制御メカニズムを探求します。

【カテゴリ D：人間社会におけるシステム・制御】

社会科学や経済学，心理学など人文社会系の視点を取り入れた，人間社会におけるシステムの解析や設計について最新の理論を紹介します。

本シリーズは，大学院生，研究者，そしてシステム・制御に関心を持つすべての皆様を対象としています。各巻は，第一線の研究者によって執筆され，最新の研究成果，未解決問題，将来展望を網羅的に解説しています。本シリーズが，システム・制御の新たな地平を切り拓く一助となることを願ってやみません。

それではともに，システム・制御のニューフロンティアへと踏み出しましょう！

2025年8月

「シリーズ システム・制御のニューフロンティア」編集委員会

# まえがき

知能とは何か？ この問いに対し、「知能的な振る舞いを生み出すシステムには、主体の物理的実体と環境との相互作用，すなわち，身体性（embodiment）が不可欠である」とする概念が提唱されてから 30 年あまりが過ぎた。ビッグデータや機械学習の実用化などの技術革新を基盤とした第 3 次 AI ブーム，我々の生活様式を一変させた世界的パンデミックなど，時代が大きく変化しつつある昨今，予測不能的に絶え間なく変わり続ける実世界の複雑性に対応し，柔軟かつ適応的に振る舞う知能システムが未来の社会を支える科学技術の鍵となる。そのため，実世界との関わりから生じる知能やシステム・制御論の重要性は益々高まっている。身体性に基づくシステム・制御のアプローチは，従来の工学的なアプローチにみられるような，システムすべてを厳密にモデル化し統御するアプローチとはコンセプトが大きく異なる。そのため，初学者が身体性の持つ創発的で融通無礙な姿を納得を持って捉えることは容易ではなく，また，身体性の起源から，その歴史的経緯，さらには最新研究事例までを系統的に記述した解説書，専門書は少ない。そこで本書は，まず身体性に立脚した知能（embodied intelligence）の基本的なコンセプトを平易に紹介しつつ，生物やロボットの移動運動や知覚認知といった具体的な事例からさまざまな知能に通底する身体性の輪郭を浮かび上がらせることを試みる。そして，身体性に基づく知能のあり方が，個体の振る舞いのみならず，集団や群システムといったマルチスケールな現象にも通底することを示す。そして，身体性の観点から激動し続ける実世界におけるシステム・制御の未来像について展望する。

本書は，大学院講義の教科書，参考書を想定し，おもに工学系の大学院生を読者層として想定している。また，研究室に配属されたばかりの学生（学部 4 年生，大学院修士学生）や，ロボット工学，制御工学，その周辺分野に興味を持

つ技術者，研究者も対象としている。本書の内容は，大学・大学院レベルの数学・物理の知識を持つ人が，できるだけ一人で読み進め，理解し，実践できるレベルに設定されている。一方で，環境との相互作用“力学（ダイナミクス）”に立脚する身体性の概念を理解する上で，力学，特に時間変化を伴う動力学の理解は必須であるため，前提知識となる。不安な読者は，力学に関する良書を片手に読み進めていただくことを推奨したい。特に，2章には，力学系を含む発展的な内容（リミットサイクル，ポアンカレ写像など）も含まれている。本書は，「身体性知能とシステム・制御」に関連するはじめての日本語の標準的な教科書や専門書を目指しており，身体性に基づくシステム設計，制御に関する事例の整理，体系化を試みた。

1章では，身体性に立脚した知能の概念と本書の目的をまとめた。知能の定義に関する議論から始め，身体性に基づく知能の「起源」，「歴史」的経緯について紹介し，その後，「本書の目的」を述べている（身体性に関連する必須「概念」，マイルストーンとなる研究「事例」および関連する国内外の「プロジェクト」を付録にまとめた）。2章から6章の構成として，身体性に基づく知能的システムを構成・設計する上で基盤となる「要素」を基準としている。具体的には，「骨格」を基盤として創発する知能としての受動歩行現象（2章），「アクチュエータ」を基盤として創発する知能システムとしての無脳ロボット（3章），「神経系」を基盤として創発する知能システムを構成するための Central Pattern Generator（CPG）に基づく制御（4章），「ヘテロな身体部位間の協調」を基盤として創発する知能としての全身協調運動の発現原理と設計（5章），「個体間相互作用」から創発する知能としての群知能システム（6章），という構成とした。

2章では，受動歩行と身体性についてまとめた。特に，本書の主たる話題である脚式ロコモーション（移動運動）の特徴と，脚式ロコモーションに着目する意義から説明した。そして，脚式ロコモーションにおいて，「身体性」の重要性を動機づける研究のパイオニアといえる受動歩行現象について紹介した。歩行現象の記述から始め，受動歩行現象をモデル化する支配方程式の導

出について説明した。さらに、受動歩行現象の安定性解析の数理的アプローチと制御理論の解釈を説明した。また、力学系としてみた際の受動歩行現象の特性と、最新の研究事例を紹介した。本章には、受動歩行現象をモデル化したシミュレータをPythonでコードした資料 (GitHub: <https://github.com/daiowaki1229/python-passive-walker.git>) および Web アプリ (<https://python-passive-walker.streamlit.app/>) を公開している。シミュレーション上での実体験から、身体と環境の相互作用から発現する歩行現象を実感していただきたい。

3章では、ロボットや動物が複雑な環境で活動するために重要となるアクチュエータの特性と、それを活かす身体構造についてまとめた。特に、工学と動物の二つの観点から、身体性を能動的に活用するためのモータや筋肉の諸元について説明した。まず、工学の観点では、近年発展が著しいソフトアクチュエータやロボット用アクチュエータを紹介した。さらに、アクチュエータから発現する運動創発現象の例として無脳歩行現象を取り上げた。現象のモデル化、およびその安定性や分岐現象の解析事例を紹介し、2章で述べた力学系解析との具体的な接続を試みた。動物の観点では、生体筋特性の多様性と普遍性について説明した。さらに、読者の実践的な理解のために動物解剖の方法を紹介した。また、生体筋の筋特性をロボットへと実装するための方法として、Hillの三要素モデルの実機実装と、マッキベン型人工筋について紹介した。人工筋の製法とその諸元を紹介し、生体筋の特性との類似性について議論した。

4章では、脚式移動ロボットにおける身体性に基づくシステム・制御設計の事例として、動物の神経系を模した Central Pattern Generator (CPG) を規範とする制御手法についてまとめた。まず、四脚動物の歩行パターン生成を題材とし、脚協制御を実現する神経基盤 (CPG 制御) について紹介した。そして、CPG 制御の代表的な既存制御を紹介し、身体性に立脚したアプローチの要諦 (設計指針) について説明した。さらに、状況依存的な脚協制御を生み出すことを目的として提案された「手応え」制御の概念を紹介し、手応え制御を用いた研究事例を紹介した。手応え制御を実装した簡易的なホッピングロボットのシミュレーション事例と

して、GitHub (<https://github.com/daiowaki1229/pyTegotaeCPG.git>) および Web アプリ (<https://pytegotaeacpg.streamlit.app/>) を公開している。手応え制御から創発する身体性知能の実体験となれば幸いである。

5章では、動物が示す脚部のみならず体幹部を活用した運動様式を題材とし、脚式移動ロボットにおける脚部と体幹部という異質なサブシステム間の協調制御を扱った身体性システム・制御設計についてまとめた。まず、規範となるさまざまな動物の全身運動について概説し、異質な身体自由度の協調運動の協調様式のあり方についてまとめた。つぎに、動物の示す適応的な脚部・体幹部の協調運動の再現や発現機序の理解のために取り組んだ研究事例について紹介している。具体的には、身体の機械的な接続に着目したアプローチと、運動指令の制御的接続に着目したアプローチについてそれぞれの取り組みとアプローチの特徴をまとめている。全身のしなやかな振る舞いを生み出すためのサブシステムの“つなぎ方”について、身体性システムの観点を広げていただきたい。

6章では、5章まで扱ってきた移動体システムの枠組みを移動体の集団システム、すなわち群れシステムへと広げて、身体性知能に基づくシステム・制御設計の事例をまとめた。本章では、非常に単純な系である自己駆動粒子の群れから出発し、徐々に身体性を追加した事例を説明することで、群れシステムにおいて身体性を考慮することの意義がわかりやすくなるように試みた。エージェント単体では議論できなかった群れシステムにおけるさまざまな相互作用様式を事例に、身体性知能に基づくシステム設計の視点を広げていただきたい。

7章では、2章から6章において紹介した、身体性知能に基づくシステム設計に関する事例を整理し、その体系化を試みた。これにより、身体性に基づくシステム設計・制御の重要なポイント、いわゆる「コツ・キモ」を明確化した。最後に、現在および未来の展望として、関連する最新分野や著者らの興味のあるトピックを五月雨式に枚挙し、まとめの節とした。これにより、身体性に基づくシステム・制御の現状と将来の方向性についての知見が深まることを期待している。

本書では、読者らの身体性に関連する思考を促す試みとして、1~6章に章末

問題を設けた。しかしながら、数学、物理などの専門科目と異なり、身体性に関連する研究領域には確立した解答がないのが現状である。そのため、解答例は付けていないが、必要があれば、著者らに問い合わせいただきたい。

本書が、読者の心に身体性に基づく知能とシステム・制御の深遠な理解と魅力を植え付けることを切に願う。本書の各章は、理論と実践の橋渡しを目指し、知識の深化とその応用への道を照らすことを意図して構成した。本書が、未来の破壊的革新を担う工学者や研究者の皆様になんか新たなインスピレーションを与え、知能システムの設計や制御技術の進化に貢献すること、を著者らは心に願い、この編集に（寝る間も惜しんで）奮励した。読者一人ひとりが本書から得た洞察を自らの研究や実務に活かし、新たな発見へとつなげることが、著者らにとって最大の喜びとなる。

2025年8月

著者一同

#### 執筆分担

大脇 大：1章, 2章, 4章, 7章, 8章, 付録  
福原 洸：5章, 6章, 8章  
増田容一：3章, 8章

#### 【本書ご利用にあたって】

本文中に記載している会社名、製品名は、それぞれ各社の商標または登録商標です。本書では  $\text{\textcircled{R}}$  や TM は省略しています。

# 目 次

## 1. 身体性に立脚した知能の概念と本書の目的

1.1 知能, 身体性, 身体性に立脚した知能とは? .....	1
1.1.1 知能とは? .....	1
1.1.2 身体性, 身体性に立脚した知能とは? .....	5
1.2 身体性の起源と歴史的背景 .....	7
1.3 本書の目的 .....	13
章末問題 .....	15

## 2. 受動歩行と身体性

2.1 脚式ロコモーションの特徴と意義 .....	16
2.1.1 脚式ロコモーションとは? .....	16
2.1.2 脚式ロコモーションと生物規範ロボティクス .....	17
2.1.3 脚式ロコモーションにおける受動歩行研究の位置づけ .....	18
2.2 受動歩行とは? .....	19
2.2.1 工学的意義 .....	20
2.2.2 非線形力学現象としての受動歩行 .....	20
2.2.3 受動歩行にみられる制御構造 .....	21
2.2.4 受動走行, 四脚受動歩行, 多脚受動歩行 .....	22
2.3 受動歩行のモデル化 .....	24
2.3.1 歩行運動の力学 .....	24
2.3.2 片脚支持期の運動方程式 .....	27
2.3.3 両脚支持期の切り替え方程式 .....	30

2.4 受動歩行のシミュレーション	35
2.4.1 定常歩行	35
2.4.2 分岐現象（環境適応性）	36
2.4.3 リミットサイクル歩行	37
2.4.4 身体特性の影響	38
2.4.5 吸引領域（初期値依存性）	39
2.5 受動歩行の安定性解析	40
2.6 受動歩行に内在する安定化構造	44
2.7 力学系としての受動歩行現象	46
2.8 演習：受動歩行モデルのシミュレーション	47
2.8.1 シミュレーションの概要	48
2.8.2 メインプログラムの構成	48
2.8.3 Streamlit を用いた Web アプリ	50
章末問題	51

### 3. アクチュエータ特性から生じる運動知能

3.1 ロボットの運動におけるアクチュエータの硬さと柔らかさ	53
3.1.1 アクチュエータのさまざまな柔らかさ	53
3.1.2 ロボットのアクチュエータ	55
3.1.3 脚ロボットのアクチュエータ	57
3.2 モータの電氣的受動特性から生じる運動パターン	60
3.2.1 モータに備わる電氣的受動特性	61
3.2.2 電氣的受動特性が制御則になっている	62
3.2.3 電氣的受動特性から生じる周期運動の安定化現象	63
3.2.4 1自由度跳躍ロボットのモデリング	67
3.2.5 バネ質点系における複数モータの同期および運動遷移現象	72
3.2.6 無脳ロボットにおける複数モータの同期および歩容遷移現象	73
3.3 動物の筋肉における柔らかさ	79
3.3.1 動物のサイズと柔らかさの関係	80
3.3.2 動物の多様な筋特性	81

3.3.3	筋肉の配置	83
3.3.4	動物解剖について	86
3.3.5	筋肉のモデルとロボットへの実装法	90
3.3.6	動物の筋肉と人工筋	97
3.3.7	人工筋の入手について	101
章末	問題	102

## 4. 脚式移動ロボットの身体性に基づく脚協調制御

4.1	多種多様な歩行パターンを発現する四脚哺乳動物	103
4.2	四脚動物の歩容生成を司る神経機構	105
4.3	生物規範型四脚ロボット	109
4.3.1	Raibert のホッピングロボット	109
4.3.2	Tekken (鉄犬)	110
4.3.3	位相リセット法	111
4.3.4	EPFL の四脚ロボット	112
4.4	身体性に基づく脚間協調制御	113
4.4.1	脚間協調制御の設計指針	113
4.4.2	身体を介した力学的相互作用を活用する脚間協調制御	115
4.4.3	OscilleX が示した歩容	117
4.5	「手応え」制御としての再解釈	118
4.5.1	「手応え」, 「手応え」制御とは?	118
4.5.2	四脚ロボットの脚間協調制御の再解釈	119
4.6	六脚ロボットの手応え制御	120
4.7	二脚ロボットの手応え制御	123
4.8	「手応え」制御の設計方策	129
4.9	演習: 「手応え」制御のシミュレーション	131
4.9.1	メインプログラム ‘pyTegotaeCPG_odeint.py’	131
4.9.2	力学モデル ‘SMDwPO.py’	133
4.9.3	アニメーション ‘video_pyTegotaeCPG.py’	136

4.9.4 Streamlit を用いた Web アプリ ‘streamlit_pyTegotaeCPG.py’	136
章 末 問 題	136

## 5. 全身協調運動にみるシステムのつなぎ方

5.1 脚の協調運動から全身の協調運動へ	137
5.2 動物の全身をめぐる動き	139
5.2.1 脊椎動物の全身運動	140
5.2.2 無脊椎動物の全身運動	143
5.3 機械的接続に着目したシステム設計	145
5.3.1 体幹の受動的屈曲による脚部・体幹部の協調運動の実現	146
5.3.2 機構的な連動による脚部・体幹部の協調運動の実現	148
5.4 制御的接続に着目したシステム設計	152
5.4.1 チーター様走行におけるフィードフォワード制御モデル	153
5.4.2 チーター様走行における反射の連鎖モデル	156
5.4.3 チーター様走行におけるセンサフィードバック制御モデル	157
5.4.4 サンショウウオ・ムカデ様の歩行・遊泳における運動遷移制御モデル	161
5.5 身体部位間の調和的協調運動を生み出すシステムのつなぎ方	165
5.5.1 動物にみる機械系・制御系の統合様式	166
5.5.2 身体部位の基本となる運動様式的设计	168
5.5.3 身体部位間の接続様式的设计	169
5.5.4 全身運動を引き出す条件づけ的设计	170
章 末 問 題	171

## 6. 群れシステムと身体性、多様な相互作用のあり方

6.1 個体の動きから群れの動きへ	173
6.2 自己駆動粒子によって形成される群れシステム	174
6.2.1 Boid モデル	175

6.2.2	群れシステムの柔軟な振る舞いを生み出すポイント	178
6.2.3	群れシステムにおける身体性とは？	180
6.3	情報伝達物質を活用した群れシステム	182
6.3.1	フェロモンを活用した餌場選択と確率的表現	183
6.3.2	フェロモンを活用した多様な蟻道パターンの形成	187
6.3.3	フェロモンを活用した構造物形成	190
6.3.4	情報伝達物質を介した相互作用の設計	192
6.4	自律個の身体的特徴を活用した群れシステム	194
6.4.1	エージェントの物理的接触と犠牲を活用した群れシステム	194
6.4.2	エージェントの身体の柔軟性を活用し環境を切り拓く群れシステム	198
6.4.3	選択的相互作用を可能とする身体と群れシステム	200
6.4.4	身体の物理的接触を介した相互作用の設計	202
6.5	群れシステムにおける身体性と相互作用の方向づけ	204
章 末 問 題		208

## 7. 身体性に基づくシステム・制御の将来展望

7.1	身体性に基づく知能システムの設計・制御の体系化	209
7.2	身体性に基づく知能システム設計の心得	212
7.3	将来展望	214
7.3.1	陰陽制御	214
7.3.2	環世界：生物からみた世界	215
7.3.3	弱いロボット	217
7.3.4	サイボーグ：生物の人工物化	218
7.3.5	さまざまな刺激-応答性の活用	220
7.3.6	大規模言語モデル（LLM）と身体性	222

8.	1～7章の概要	224
----	---------	-----

付 録	228
A.1 関連する必須の概念	228
A.1.1 一般化フレーム問題 (generalized frame problem)	228
A.1.2 アフォーダンス (affordance)	230
A.1.3 創発 (emergence)	231
A.1.4 自己組織化 (self-organization)	232
A.1.5 オートポイエシス (autopoiesis)	233
A.1.6 参照フレーム問題 (The frame of reference problem)	234
A.1.7 サイモンの浜辺のアリ (Simon's beach ants)	235
A.1.8 包摂アーキテクチャ (subsumption architecture)	236
A.1.9 感覚運動協調 (sensor-motor coordination)	238
A.1.10 構成論的手法 (synthetic approach)	238
A.1.11 人間機械論 (cybernetics)	239
A.1.12 身体性認知科学 (embodied cognitive science)	240
A.1.13 人工生命 (artificial life)	240
A.1.14 進化ロボティクス (evolutionary robotics)	241
A.1.15 生物規範ロボティクス (bio-inspired robotics)	242
A.1.16 モーフォロジカルコンピューテーション (morphological computation)	243
A.1.17 ソフトロボティクス (soft robotics)	243
A.1.18 ロボティクス規範生物学 (robotics-inspired biology)	244
A.2 マイルストーンとなる研究事例	245
A.2.1 ブライテンベルク・ビークル (Braitenberg vehicles)	245
A.2.2 スイスロボット：掃除する Didabot	249
A.2.3 Brooks のロボット：Myrmix, Ghengis, Cog	250
A.2.4 受動歩行機械 (passive dynamic walker)	252
A.2.5 群知能を示す Boid モデル (Boid model)	252
A.2.6 進化する仮想生物 (evolving virtual creature)	253
A.2.7 モジュラーロボット (modular robots), 群ロボット (swarm robots)	254
A.2.8 物理リザーバー計算 (physical reservoir computing)	255
A.3 関連する国内外の研究プロジェクト	256
A.3.1 自律分散システム (1990~1992 年度)	256

A.3.2	創発システム（1995～1997 年度）	256
A.3.3	移動知（2005～2009 年度）	257
A.3.4	浅田共創知能システムプロジェクト（2005～2010 年度）	257
A.3.5	Locomorph（2009～2013 年）	258
A.3.6	OCTOPUS（2009～2013 年）	258
A.3.7	身体性システム科学（2014～2018 年度）	259
A.3.8	ソフトロボット学（2018～2022 年度）	260

引用・参考文献	261
あ と が き	301
謝 辞	306
索 引	308

1.1.2 身体性, 身体性に立脚した知能とは?

本書では, 身体性 (embodiment) を

身体 (主体の物理的構造) と環境との相互作用

と明確に定義し, 以降の議論を進める†。

この定義から, 身体性に立脚した知能 (embodied intelligence) とは

行動主体の知能的な振る舞い (知能) が, 単に脳内での情報処理だけではなく, 身体全体と環境との相互作用を通じて形成され, 生み出される

という, 見方, 考え方, 視座を指す (図 1.1)。この考え方の起源は古く, 哲学, 心理学, 認知科学, 生物学などの多様な分野での議論の中で徐々に形成されてきた。身体性の概念の誕生は, 人間の知能や意識を理解するための新しい視点

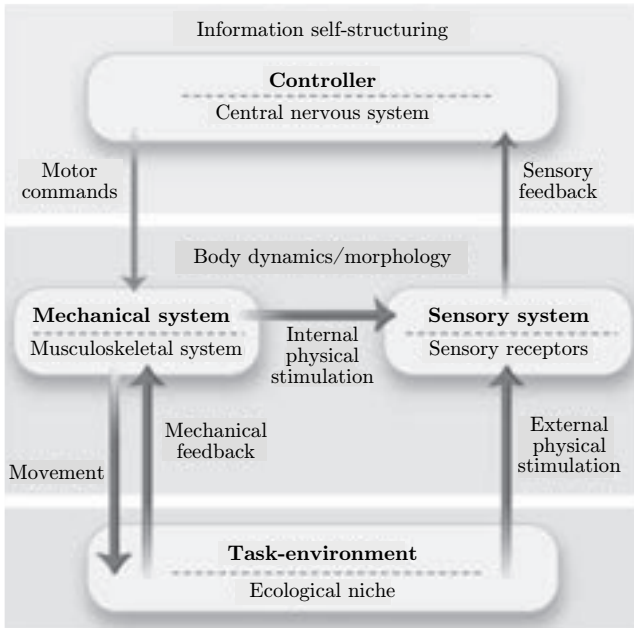


図 1.1 身体性 (文献 9) より引用

† 定義を明示する文献があまり見つからないが, 後の議論のために明文化した。

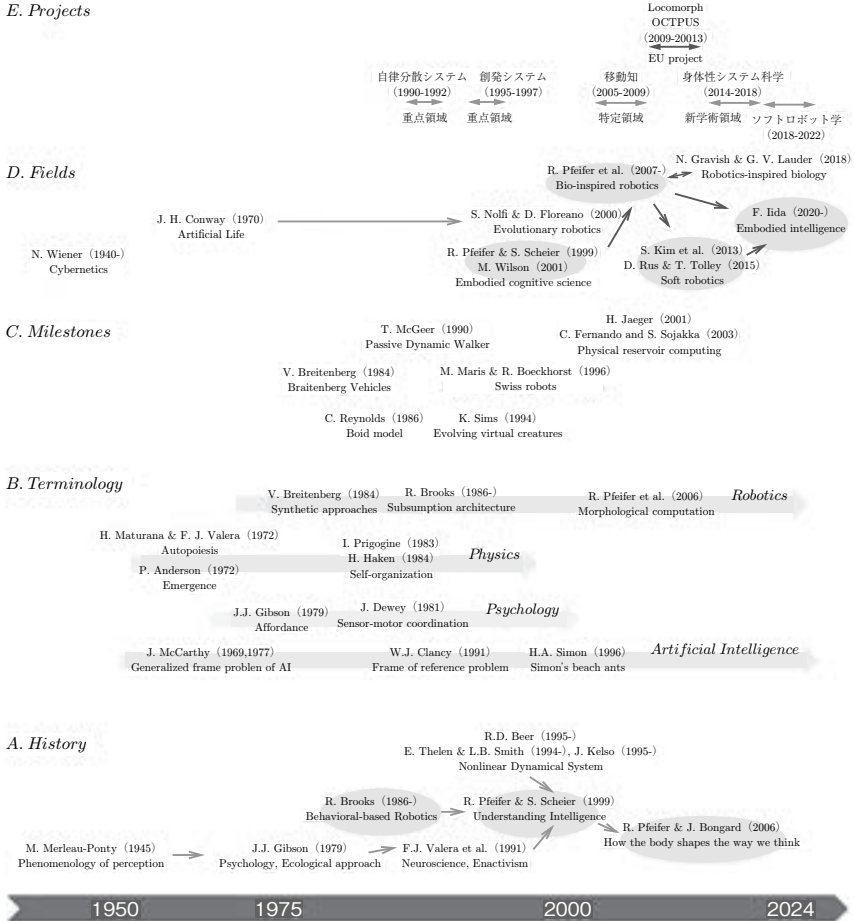


図 1.2 身体性に関連する時系列：A：歴史，B：用語（付録 A.1 節），C：マイルストーン（付録 A.2 節），D：分野，E：国内外プロジェクト（付録 A.3 節）。本時系列は、本書で引用として挙げた文献の年代順にて並べている。

ろうとした。

心理学 (psychology) では、Gibson が、知覚は個体とその環境との相互作用の中で生じるというエコロジカルなアプローチ (ecological psychology) を提示した<sup>20)</sup>。Gibson は、知覚は静的な受容過程ではなく、動的な探求過程であると捉えた。エコロジカルアプローチは、環境と生物との相互関係の中で知覚

長い旅路を味わい、より楽しむためのよき助けとなる道具立て、装備品（付録も含む）である。もし、一時的に現在地や行く先を見失った場合は、いま一度この章に立ち戻り、道具や装備品を整理し見直すことで、新たな道に光が差すこともあるだろう。

2章から6章の構成として、身体性に基づく知能的システムを構成、設計する上で基盤となる「要素」を基準として構成している（図1.3）。具体的には、「骨格」を基盤として創発する知能としての受動歩行現象（2章）、「アクチュエータ」を基盤として創発する知能システムとしての無脳ロボット（3章）、「神経系」を基盤として創発する知能システムを構成するCPG制御（4章）、「ヘテロな身体部位間の協調」を基盤として創発する知能としての全身協調運動の発現原理と設計（5章）、「個体間相互作用」から創発する知能としての群知能システム（6章）、という構成とした。「骨格」は、主体の運動様式を規定する最も根源的な“拘束条件”であり、環境との相互作用の“最前線”となる。「アクチュエータ」は、「骨格」と「神経系」を結ぶ“媒介”であり、運動生成の“動力源”となる。「神経系」は、アクチュエータを起点として生成される身体骨格運動を統御する“指揮者（コーディネータ）”となる。これら、「骨格」、「アクチュエータ」、「神経系」は、すべて同一な（ホモ, homogeneous）要素から構成されて

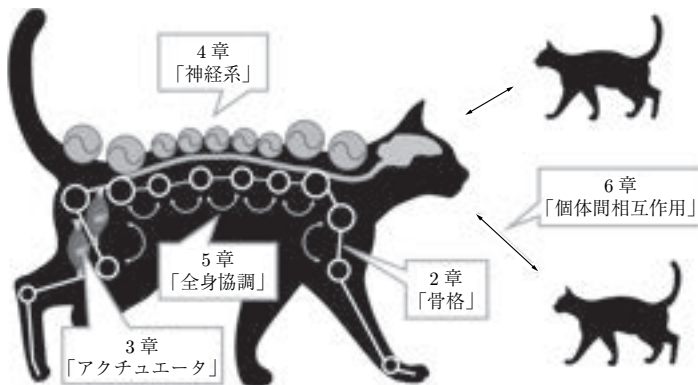


図1.3 2～6章の構成。各「要素」を基盤として創発する知能の観点から構成されている。

いるわけではなく、「ヘテロ (heterogeneous) な身体部位」ごとの性質を有し、それらの相互結合による協調関係から、身体性に基づく知能は生成される。また、単一個体からみれば他個体はある種の環境であり、「個体間相互作用」は群知能などのマクロなレベルでの身体性に基づく振る舞いの鍵となる。

本書では、これらの各「要素」を基盤として創発する知能という観点から、「骨格」、「アクチュエータ」、「神経系」、「ヘテロな身体部位間協調」、「個体間相互作用」をキーワードとして、各章をまとめた。各章は、それぞれが独立して完結する内容であり、読者の興味のある章から読んでいただいても読み進めることができるよう説明されている。身体性の特性から、各「要素」間の相互作用は不可欠であり、知能創発の本質である各章間の相互連関を考慮しながら読み進めていただけると、身体性に基づく知能についての理解がより深まるだろう。

それでは、以降の旅路が、読者にとって新たなインスピレーションを与え、革新的な知能システムの設計や制御技術の創出への一助となることを願い、皆さんを見送ることにしよう。Bon voyage! (よい旅を!)

## 章 末 問 題

- 【1】 1章、付録 A.1 節、A.3 節を参考に、身体性について、300 words 程度の英語で説明せよ。
- 【2】 【1】と同様に、身体性に基づく知能について、300 words 程度の英語で説明せよ。
- 【3】 身体性に基づく知能の具体例を挙げ、どのような構成要素とそれらの相互作用様式から創発する知能かを、論理的に説明せよ。

# 付 録

## A.1 関連する必須の概念

本付録では、身体性の概念を議論する上で、必須となる基本的な概念、専門用語、関連分野、マイルストーンとなる研究、関連する国内外のプロジェクトについて解説する。それぞれの小項目は、独立的に各用語を解説する構成になっており、それらの関連性やより詳細な理解はそれぞれの原著などを紐解くことを勧める。

### A.1.1 一般化フレーム問題 (generalized frame problem)

フレーム問題 (frame problem)<sup>441)~443)</sup> とは

ある行動による環境変化をすべて明示的に記述することは不可能であり、記述、推論のためには計算量が指数関数的に増大してしまう

という問題である。フレーム問題についてはさまざまな定義があり、研究者によって意味の解釈も多様<sup>443)</sup> であるが、本書では、後述の参照フレーム問題と明確に区別するために、一般化フレーム問題 (generalized frame problem) と呼ぶ。フレーム問題は、人工知能研究から生まれた数少ない哲学的問題うちのひとつと言われている<sup>†</sup>。行動の前提と帰結の記述量が膨大になる記述の問題と、行動の帰結の (予測) 計算量が膨大になる処理の問題に分類し議論されてきた<sup>444)</sup>。

まず、哲学者である Dennett の「爆弾と人工知能搭載ロボット」<sup>445)</sup> の例を用いて、フレーム問題を解説する。状況 (タスク) として、洞窟の中にロボットを動かすバッテリーがあり、その上に時限爆弾が仕掛けられている状況を想定する。このままでは爆弾が爆発し、バッテリーが破壊され、ロボットはバッテリー交換ができなくなる。人工知能搭載ロボットは「バッテリーを取ってくる」よう指示される。

ロボット A は、洞窟に入り無事にバッテリーを取り出すことができた。しかし、ロボット A はバッテリーの上に爆弾が載っていることは認識していたが、バッテリーを運ぶと爆弾も一緒に運び出してしまうことを理解していなかったため、洞窟から出た後に爆弾が爆発してしまう (図 A.1(a))。この結果は、ロボット A がバッテリーを

<sup>†</sup> 人工知能分野で普遍的な問題が議論されるのは稀のようだ。

# 索引

<b>【あ】</b>		<b>【え】</b>		関節剛性	125
相反するルールの拮抗	178	エージェント	253	完全非弾性衝突	26
アクチュエータ	14, 18	エコステートネットワーク	255	<b>【き】</b>	
脚	17	エコロジカルアプローチ	8	犠牲	195
足	17	エナクティビズム	9	蟻道	182
足首関節	123	エラスティック	55	揮発性	185
アフオーダンス	9, 230	遠心力, およびコリオリ力	29	脚間協調	103
アロメトリー	80	の項	29	脚式ロコモーション	17
安定性	21, 243	<b>【お】</b>		ギャロップ	103
安定性解析	21	オイラー・ラグランジュ法	27	キャンター	104
<b>【い】</b>		オートポイエシス	233	吸引領域	39
位相	114	<b>【か】</b>		強化学習	131
位相振動子	111	解析的ポアンカレ写像	41	局所性	178
位相リセット	111	解剖	87	局所センサフィードバック	116
一次遅れ系	126	カオス	20	筋横断面積	82, 92
一般化フレーム問題	228	カオス歩行	38	筋原線維	90
遺伝的アルゴリズム	130, 241	角運動量保存	26	筋線維	81, 90
移動運動	16	拡張化された認知	12	筋長が一定の際の最大の収縮力	93
移動知	257	下肢	24	<b>【く】</b>	
陰的制御則	215	荷重	116	クイックリリース試験	98
陰的な相互作用	204	仮想生物	253	空中期	156
陰陽制御	214	片脚支持期	22	蔵本振動子	78
<b>【う】</b>		感覚運動協調	238	群知能	252
ウォーク	103	感覚運動偶発性	12	群ロボット	254
羽状筋	92	感覚情報	119	<b>【け】</b>	
鎖き運動	142	感覚フィードバック	107	形態	10
運動エネルギー	28	環境	5, 18	形態学	243, 258
運動指令	119	慣性行列	29	形態形成	258
運動パターン	103	環世界	215	現象学	7
運動方程式	27				

**【こ】**

構成論的手法 238

後退歩歩容 143

行動に基づくロボティクス 237

興奮性 246

股関節 123

腰関節 123

個体間相互作用 14

骨格 14, 18

昆虫サイボーグ 219

コントローラ 19

コンプライアンス 54, 56, 57, 59, 80

**【さ】**

最終状態鋭敏性 46

最大等尺性収縮力 93

サイボーグ 218

サイモンの浜辺のアリ 235

差動機構 149

参照フレーム問題 234

**【し】**

視覚的断崖 230

時間スケール 166

刺激-応答性 220

自己安定化作用 45

自己駆動粒子 175

自己組織化 6, 232

自己組織化現象 231

支持脚期 24

システム工学 259

姿勢制御器 124

自然知能 1

シミュレーション 24

斜面 18

自由エネルギー原理 210

周期倍分岐現象 20

収縮要素 90, 94

重心 116

重力項 29

重力場 19

受動走行現象 23

受動歩行 19

受動歩行機械 252

受動歩行現象 14, 18

準受動歩行機械 20

準ダイレクトドライブ アクチュエータ 59

状況化された認知 12

除脳ネコ 105

自律個 173

自律分散システム 256

進化的計算手法 241

進化的プログラミング 241

進化ロボティクス 241

神経系 14, 103

人工生命 231, 240

人工知能 1

進行波歩容 145

身体化された認知論 11

身体性 5

——に立脚した知能 5

身体性知能 6

身体性認知 11

身体性認知科学 240

心理学 8

**【す】**

スイスロボット 249

数理モデリング 210

スケール則 80

ステートマシン 196

**【せ】**

生体模倣ロボット 86

生物機械 219

生物規範ロボティクス 7, 17, 242

線形化 30

センサ 19

センサ-モータ結合 248

全身協調運動 14

**【そ】**

相空間 37

走行 22

相互作用 5

創発 6, 231

双方向センサフィードバック 則 157

速筋 82

ソフトアクチュエータ 54

ソフトネス 53

ソフトロボット学 260

ソフトロボティクス 7, 243

**【た】**

ダイアゴナルシークエンス ウォーク 104

大規模言語モデル 222

ダイナミカルシステム 231

多脚歩行 17

弾性要素 90, 94

**【ち】**

チーター様走行 142, 148

知覚 7

知覚理論 238

力-速度特性 90, 93

力-長さ特性 90

遅筋 81

知能 1

知能指数 210

中央パターン生成器 162

チューリングテスト 3

直列弾性アクチュエータ 55

**【て】**

手応え 118

手応え関数 119

手応え制御 78, 118

鉄犬 110

テトラポッド歩容 122

電氣的受動特性 60, 61

テンドン機構 150

	<b>【と】</b>	フィードバック 45, 119		<b>【む】</b>	
道標フェロモン	182	フィードバック構造 21		無次元化 46	
倒立振り子	25	フィードバックループ 239		無脳ロボット 14, 74, 75	
トカゲ様歩行	140	フィードフォワード 105		<b>【も】</b>	
トップダウン	257	複雑系 6		モータの弱さ 61	
トライポッド歩容	122	物理リザバー計算 255		モーフォロジカルコンピュ テーション 243	
トランスバースギャロップ	104	プライテンベルク・ピークル 220, 245		目標角度 125	
トロット	103	フラクタル 39		モジュラーロボット 254	
	<b>【に】</b>	フラクタル性 46		モデル化 17	
二関節筋	83	振り子時計の同期現象 78		モンテカルロ法 187	
二脚歩行	17	振る舞いの分節化 247		<b>【ゆ】</b>	
二重倒立振り子	25	フレキシブル 54		遊泳運動 162	
二足歩行	24	プロンク 104		遊脚期 24	
ニューラルネットワーク	231	分岐図 38		有限状態機械 251	
人間機械論	239	<b>【へ】</b>		床反力 124	
認知	11	並列弾性アクチュエータ 55		<b>【よ】</b>	
認知科学	10	ヘテロ 14		陽的制御則 215	
	<b>【ね】</b>	ヘテロジニアス 201		陽的な行動則 206	
ネガティブ・フィードバック	191	ベレット 190		抑制性 246	
	<b>【の】</b>	<b>【ほ】</b>		予測困難性 47	
脳科学	259	ポアンカレ写像 21		弱いロボット 217	
脳内身体表現	259	包摂 237		四脚動物 103	
	<b>【は】</b>	包摂アーキテクチャ 9, 236		四脚歩行 17	
バイオハイブリッドシステム	218	歩行 20		<b>【ら】</b>	
バウンド	104	ポジティブ・フィードバック 191		ライフゲーム 241	
バックドライバビリティ	55	ポテンシャルエネルギー 28		ラグランジアン 28	
バネ-マス-ダンパ系	131	ボトムアップ 257		ラテラルシークエンス ウォーク 104	
反射連鎖モデル	156	ホメオスタシス 239		<b>【り】</b>	
	<b>【ひ】</b>	ホモ 14		力学系 6	
膝関節	123	ホモジニアス 200		力学的相互作用 117, 195	
非線形力学	9	歩容 103		リハビリ医学 259	
	<b>【ふ】</b>	歩容遷移 117		リミットサイクル 20	
ファンデルポール振動子	78	<b>【ま】</b>		両脚空中期 22	
		松岡振動子 78			
		松岡振動子モデル 110			
		マッキベン型人工筋 97, 101			

<p><b>【ろ】</b></p> <p>ロータリーギャロップ 104</p>	<p>ロコモーション 16</p> <p>六脚歩行 17</p>	<p>ロボティクス規範生物学 244</p>
---	----------------------------------	------------------------

<p><b>【A】</b></p> <p>allometry 80</p> <p><b>【B】</b></p> <p>back-drivability 55</p> <p>basin of attraction 39</p> <p>Beer 9</p> <p>behavior-based robotics 237</p> <p>Boid モデル 174, 252</p> <p>Boid model 252</p> <p>Boston Dynamics 109</p> <p>Brooks 9, 237</p> <p><b>【C】</b></p> <p>CE 94</p> <p>Central Pattern Generator 103</p> <p>ChatGPT 2, 222</p> <p>Cheap Optimal Control 22</p> <p>compliance 54</p> <p>Compliant Oscillator 63</p> <p>contractile element 94</p> <p>CPG 14, 103, 162</p> <p>CPG-RL 113</p> <p><b>【D】</b></p> <p>Didabot 249</p> <p>direct wave gait 145</p> <p><b>【E】</b></p> <p>elastic 55</p> <p>Electronics-free 221</p> <p>extended gait 156</p>	<p><b>【F】</b></p> <p>Fictive Locomotion 107</p> <p>finite-state machine 251</p> <p>flexible 54</p> <p>flexible microactuator 55</p> <p>FMA 55</p> <p>fractal 39</p> <p>FSM 251</p> <p>F-L 特性 90, 91</p> <p><b>【G】</b></p> <p>GA 130</p> <p>gait cycle 24</p> <p>gathered flight 157</p> <p>genetic algorithm 130</p> <p>Gibson 8</p> <p>GRF 124</p> <p><b>【H】</b></p> <p>heterogeneous 201</p> <p>Hill の三要素モデル 93</p> <p>Hill モデル 93, 98</p> <p>homogeneous 200</p> <p>Huygens' synchronization 78</p> <p><b>【K】</b></p> <p>Kuramoto oscillator 78</p> <p><b>【L】</b></p> <p>Large Language Model 2</p> <p>LLM 2</p> <p><b>【M】</b></p> <p>Matsuoka oscillator 78</p>	<p>mesencephalic locomotor region 108</p> <p>MLR 108</p> <p>Monte Carlo method 187</p> <p>MUSHIBOT 120</p> <p><b>【O】</b></p> <p>OscilleX 114</p> <p><b>【P】</b></p> <p>parallel elasticity 94</p> <p>parallel elastic actuator 55</p> <p>passive dynamic walker 252</p> <p>patella lock 86</p> <p>PCSA 92</p> <p>PE 94</p> <p>PEA 55</p> <p>phase space 37</p> <p>physical communication 117</p> <p>physiological cross-sectional area 92</p> <p>Python 35</p> <p><b>【Q】</b></p> <p>QDD アクチュエータ 59</p> <p><b>【R】</b></p> <p>Raibert 109</p> <p>Reflex 106</p> <p>retrograde wave gait 143</p> <p><b>【S】</b></p> <p>SEA 55</p> <p>series elastic actuator 55</p> <p>SLIP モデル 81</p>
--	---	---

softness	53
sprawling posture	140
spring-loaded-inverted- pendulum モデル	81
stay apparatus	86
stigmergy	192
Streamlit	50
subsume	237
<b>【T】</b>	
Tekken	110
template	192
Transformer	2

<b>【U】</b>	
unpredictability	47
upright posture	141
<b>【V】</b>	
Van der Pol oscillator	78
Varela	9
<b>【W】</b>	
weakness	61
Web アプリ	50

<b>【Z】</b>	
ZMP	19
~~~~~	
<b>【数字】</b>	
1 次元跳躍ホッピングモデル	129
1 周期	24
1 周期歩行	36
2 周期歩行	36
2-Delay フィードバック構造	23
4 周期歩行	36

—— 著者略歴 ——

大脇 大 (おおわき だい)

- 2004年 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業
- 2006年 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了 (計算理工学専攻)
- 2009年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (電気・通信工学専攻),  
博士 (工学)
- 2009年 東北大学助教
- 2019年 東北大学准教授  
現在に至る

福原 洸 (ふくはら あきら)

- 2013年 東北大学工学部機械知能・航空工学科卒業
- 2015年 東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了 (機械システムデザイン工学専攻)
- 2018年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (電気エネルギーシステム専攻),  
博士 (工学)
- 2018年 東北大学助教  
現在に至る

増田 容一 (ますだ よういち)

- 2013年 和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科卒業
- 2016年 和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程修了 (システム工学専攻)
- 2019年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (機械工学専攻),  
博士 (工学)
- 2019年 大阪大学助教  
現在に至る

# 身体性知能とシステム・制御

Embodied Intelligence: A New Paradigm for System & Control

© Dai Owaki, Akira Fukuhara, Yoichi Masuda 2025

2025年10月6日 初版第1刷発行

検印省略

著者 大脇 大  
福原 洗  
増田 容一  
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03401-1 C3353 Printed in Japan

(齋藤)



JCCOPY <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、そのつど事前に、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。