

ロボット産業が再び注目されています。人工知能技術の発展は画像認識や音声認識、自然言語処理といった領域に大きなインパクトを与えて、実世界情報処理の可能性を大きく広げました。ディープラーニングに代表される2010年代に入ってからの人工知能ブームは機械学習技術をその本質にしながらも、「人工知能」という一括りの言葉で、多くの人を惹き付け、また、多くの企業や学者、政府、そして一般の人々の未来展望を揺さぶっています。アニメやゲームを通してロボット好きの日本人は特に、人工知能の発展と聞くと、万能な家庭用ロボットや産業用、オフィス用のロボットの実現を連想します。「人工知能 × ロボティクス」への注目は2010年代後半以降の学問や産業の発展を間違いなく後押ししていくでしょう。

さて、2010年代の人工知能ブームはほぼ「パターン認識ブーム」だと括ることが出来ます。パターン認識とはロボットが世界を「認識」するための技術です。しかし、ロボットが私達の暮らす世界の中で活動し、私達の仕事を手伝おうとするならば、ロボットは実世界の中で「行動」する必要があります。身体を動かすことは物理学でいえば力学の延長線上に存在し、それは、多くの人工知能研究やIT技術で扱われるような、コンピュータの中に閉じた情報処理とはまた異なった学問と知識と感性を要求します。人工知能 × ロボティクスの時代にあっては、そのような実世界でロボットが動くための学問を感覚的に理解し、動かし、語れる人材がより多く求められるでしょう。

本書はこれまでに出版されてきたロボット工学の教科書よりも、より広い層に学んでいただき、できるだけ平易にご理解いただくために、ストーリーを交えながら魅力的な一冊を作ろうと努めました。ストーリーを形作るために、拙著『イラストで学ぶ人工知能概論』で活躍したホイールダック2号くんがホイールダック2号@ホームとして装いも新たに再登場してもらいました。「このホイールダック2号@ホームを家庭用ロボットとしてチューンナップして行く」というストーリーのうえで、皆さんには少しずつロボット工学の知識を学んでいただければと思います。

筆者の木野仁先生は終始エネルギーに執筆してくださいました。初めてお会いしたときからガンオタ（ガンダムオタク）教授の称号にふさわしい

コテコテのノリで、企画が始まったときから「個性的な一冊」ができて上がることは約束されていたかと思います。編集の横山真吾さんには前作『イラストで学ぶ人工知能概論』に引き続きテンポの良いマネジメントで企画を出版まで導いていただきました。イラストの峰岸桃さんには子育ての忙しい中、ホイルダック 2号のバージョンアップや新キャラのデザインにも活躍していただきました。四人のチームで作ったこの一冊が、皆さんのロボット工学への心の壁を取り除く秘密兵器になれば幸いです。

2017年8月

京都の自宅にて 谷口忠大

はじめに

本書ではロボット工学の中でも、特にロボットのマニピュレータの制御について学んでいく。しかし、対象をマニピュレータ制御に限定したとしても、多くの知識を必要とする。マニピュレータ制御に関して数多くの良書が存在するが、これらは非常に専門性が高く、内容の理解には高度な工学知識を必要とすることが多い。そして、それらの工学知識の根底にあるものは数学と物理である。一方、最近の細分化された大学の学部・学科では、カリキュラム上の問題から、専門性の高い数学・物理の教育に十分な時間を割くことができず、結果として、マニピュレータ制御の良書を理解できるだけの知識を習得できない学生が多い。

そこで本書では、マニピュレータの運動を平面内に限定することで、できるだけ高校や大学初等レベルの基礎的な数学・物理の知識を利用し、マニピュレータ制御を解説していく。それでも、可能な限り重要な数学的記述を省略することなく、ロボット工学における数学的・物理的なイメージを大切にす。本書で基礎的なことを学び、より高度な知識が必要となった際には、本書巻末のブックガイドに紹介するような高度な専門書にチャレンジしてほしい。

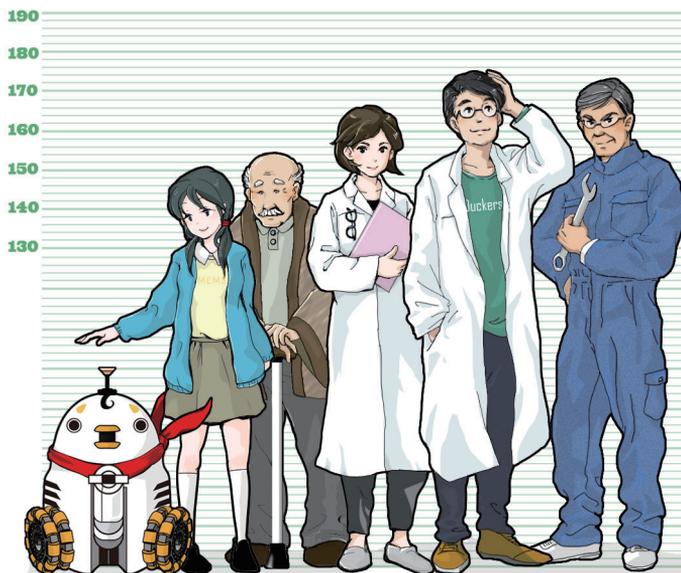
また、読者のイメージをできるだけ助けるために、姉妹書である『イラストで学ぶ人工知能概論』に登場するホイールダック 2号に再登場してもらうことにした。ホイールダック 2号にマニピュレータを新設することで、要求されるさまざまな仕事に対し、どのようにマニピュレータを制御するのかを解説していく。

なお、本書の内容の一部は、著者の電子書籍『高校の知識で挑む！ 本格的なロボット工学 (Kindle 版)』を大幅に加筆・修正したものであることをお断りしておく。

2017年7月

著者 木野 仁

本書の登場人物



ホイールダック 2号@ホーム

アヒルに見た目が似ていることから「ホイールダック 2号」と名付けられたペンギン型ロボットの改造版。シリアルリンク構造をもつマニピュレータ（ロボットアーム）を1基取り付けられることで物体把持など家庭用ロボットとして必要なタスクを実行できるようになった。

ホノカ

未来都市ハカタに住む女子中学生。ひよんなことからホイールダック 2号@ホームのモニターに選ばれる。ホイールダック 2号のことが大好きで、ホイールダック 2号の失敗でひどい目にあっても、いつも笑顔。好きな花はアジサイ。

おじいちゃん

ホノカの祖父。ホノカの自宅から徒歩圏内に住んでいる。孫のことを大変可愛がっており、ホノカも毎週のようにおじいちゃんの家顔を出している。ホノカが連れてきたホイールダック 2号を笑顔で招き入れる。実は地元の有力者。

助手

博士の研究所で研究の補助を行う助手。アメリカの一流大学で学位を取得するが、帰国し博士の研究所に参加する。趣味は乗馬。眼鏡は伊達メガネ。少女時代の将来の夢は幼稚園の先生。学位はPhD。

博士

ホイールダック 2号@ホームの生みの親。人工知能やロボット工学を始めとした多岐にわたる分野に精通している。いつの日か、ホイールダック 2号が全世界で活躍する日のことを夢見ている。趣味は紅茶と読書。学位は博士（工学）。

工場長

博士の研究所に併設される機械工作センターの技術スタッフ。通称、工場長。切削や溶接といった機械工作のみならず、センサ、アクチュエータ、電子回路、さらには計算機のオペレーティングシステムにも精通するスーパーマン。発明家でもあり特許収入は手取りを超える。

目次

監修にあたって	iii
はじめに	v

第1章

マニピュレータを制御しよう	1
1.1 ロボットとは何か?	2
1.1.1 アニメ・SF 中のロボット	2
1.1.2 学問としてのロボット工学	3
1.2 ロボットの要素技術とマニピュレータ制御	4
1.2.1 ロボットの要素技術	4
1.2.2 マニピュレータ制御	5
1.3 ロボット工学の基礎知識	6
1.3.1 システム	6
1.3.2 マニピュレータの構成要素	6
1.3.3 フィードフォワード制御とフィードバック制御	7
1.4 ホイールダック 2 号@ホームと学ぼう!	9
1.4.1 ホイールダック 2 号@ホームのストーリー	9
1.4.2 ホイールダック 2 号@ホームのスペック	9

第2章

基本的な制御 (並進系)	13
2.1 並進系の力学	14
2.1.1 物理と微分・積分	14
2.1.2 微分と速度・加速度	15
2.1.3 積分と速度・加速度	17
2.1.4 自由落下の公式と微分・積分	19
2.2 並進運動における P 制御	20
2.2.1 P 制御の考え方	20
2.2.2 P 制御の動作	23
2.3 並進運動における PD 制御	24
2.3.1 ダンパ (減衰器) とは	24
2.3.2 並進運動の PD 制御	26

第3章**基本的な制御（回転系）** 29

3.1 回転系の力学	30
3.1.1 角速度と角加速度の関係	30
3.1.2 トルクとは	31
3.1.3 慣性モーメントとは	32
3.1.4 並進系と回転系の類似性	34
3.2 回転運動における PD 制御.....	35

第4章**自由度と座標系** 39

4.1 自由度の概念	40
4.1.1 並進系の自由度	40
4.1.2 回転系の自由度	40
4.1.3 並進+回転系の自由度	41
4.1.4 関節の簡易的な表記	42
4.2 手先自由度と関節自由度	43
4.2.1 1自由度と2自由度の例.....	43
4.2.2 目的の運動と手先自由度	44
4.3 非冗長と冗長	45
4.4 関節と手先の座標系	46

第5章**順運動学と逆運動学** 49

5.1 運動学の概念	50
5.1.1 順運動学と逆運動学	50
5.1.2 関節角度センサにおける角度計測	52
5.2 順運動学	53
5.3 逆運動学	53
5.3.1 逆運動学の計算	53
5.3.2 逆運動学の特徴	55
5.4 冗長マニピュレータの運動学	56

第6章**ロボット用アクチュエータ** 61

6.1 ロボット用アクチュエータの種類	62
6.2 電磁駆動アクチュエータ	62

6.2.1	直流モータの仕組み	62
6.2.2	直流モータのトルク制御 (モータドライバ)	65
6.3	油圧駆動アクチュエータ	67
6.4	空気圧駆動アクチュエータ	68
6.5	その他のアクチュエータ	70
6.5.1	超音波アクチュエータ	70
6.6	DA 変換器 (DA コンバータ)	71

第 7 章

	ロボット用センサ	73
7.1	ロボット用センサの種類	74
7.2	角度センサ	74
7.2.1	ポテンショメータの仕組み	75
7.2.2	エンコーダの仕組み	77
7.3	角速度センサ	78
7.3.1	角速度センサの仕組み	78
7.3.2	角度センサを用いた間接的な角速度計測	80
7.4	力センサ	81
7.4.1	歪ゲージを使った力センサ	81
7.4.2	ホイートストンブリッジ回路を用いた電圧計測	83
7.5	AD 変換器 (AD コンバータ)	85
7.5.1	AD 変換器の仕組み	85
7.5.2	DA/AD 変換器を用いたロボットのシステム構築	86

第 8 章

	関節座標系の位置制御	89
8.1	PTP 制御と軌道制御	90
8.2	関節座標系 PD 制御	90
8.2.1	PD 制御を用いた 1 リンク 1 関節システムの PTP 制御	90
8.2.2	PD 制御を用いた 2 リンク 2 関節システムの PTP 制御	92
8.3	重力補償	94
8.3.1	重力の影響による誤差	94
8.3.2	1 リンク 1 関節システムの場合の重力補償	95
8.3.3	2 リンク 2 関節システムへの重力補償の拡張	96
8.4	PTP 制御を用いた簡易的な軌道制御	98

第 9 章**速度制御 101**

9.1	ベクトル・行列の基礎	102
9.1.1	ベクトル・行列の定義と基礎的な計算	102
9.1.2	逆行列	104
9.1.3	転置と微分	104
9.2	速度関係とヤコビ行列	105
9.2.1	手先速度と関節角速度の関係	105
9.2.2	手先速度と関節角速度の逆関係	107
9.3	分解速度法による軌道制御	108
9.4	特異姿勢	110

第 10 章**力制御と作業座標系 PD 制御 113**

10.1	ロボットの力制御	114
10.1.1	フィードフォワードによる力制御	114
10.1.2	フィードバック型の力制御	115
10.2	作業座標系 PD 制御法	116

第 11 章**人工ポテンシャル法と移動ロボットへの応用 123**

11.1	人工ポテンシャル法	124
11.1.1	はじめに	124
11.1.2	ポテンシャルによる PD 制御の解説	124
11.1.3	人工ポテンシャル法	126
11.2	作業座標系制御における障害物回避	127
11.2.1	マニピュレータの障害物回避	127
11.2.2	移動ロボットの位置制御への応用	128

第 12 章**解析力学の基礎 133**

12.1	静力学と動力学	134
12.1.1	バネ問題	134
12.1.2	運動方程式とは	136
12.1.3	1 リンク 1 関節マニピュレータの運動方程式 ..	136
12.2	ラグランジュ法による運動方程式の導出	137
12.2.1	ニュートン・オイラー法とラグランジュ法	137

12.2.2	一般化座標・一般化速度・一般化力.....	138
12.2.3	ラグランジュの運動方程式.....	139
12.3	運動方程式の計算例.....	139
12.3.1	【計算例 1】 斜面を滑る物体の運動.....	139
12.3.2	【計算例 2】 1 リンク 1 関節システム.....	141
12.3.3	【計算例 3】 並進と回転の複合したシステム ..	141

第 13 章

	ロボットの動力学	147
13.1	2 リンク 2 関節マニピュレータの運動方程式.....	148
13.2	順動力学と逆動力学.....	150
13.2.1	動力学の分類.....	150
13.2.2	順動力学.....	151
13.2.3	逆動力学.....	151
13.3	計算トルク法による軌道制御.....	152
13.3.1	並進 1 自由度システムの例.....	152
13.3.2	マニピュレータにおける計算トルク法.....	153
13.3.3	アクチュエータの運動方程式.....	154

第 14 章

	インピーダンス制御	157
14.1	ドアノブ問題.....	158
14.1.1	はじめに.....	158
14.1.2	ドアノブ問題の整理.....	158
14.2	電気インピーダンスと機械インピーダンス.....	159
14.3	インピーダンス制御のイメージ.....	161
14.4	インピーダンス制御の方法.....	164
14.4.1	はじめに.....	164
14.4.2	力制御ベースのインピーダンス制御.....	164
14.4.3	位置制御ベースのインピーダンス制御.....	165
14.5	コンプライアンス制御.....	167

第 15 章

	まとめ	171
15.1	ホイールダック 2 号@ホームの開発物語：総集編 ..	172
15.2	マニピュレータの構造.....	177
15.2.1	シリアルリンク構造とパラレルリンク構造.....	177

15.2.2	パラレルワイヤ駆動システム	179
15.2.3	腱駆動ロボット	179
15.3	受動歩行ロボット	181
15.4	ロボットの知能化	183
巻末付録		185
A.1	PID 制御を用いたより高精度な位置制御	185
A.1.1	PD 制御における摩擦の影響	185
A.1.2	PID 制御を使った摩擦補償	186
	ブックガイド	191
	おわりに	195
	章末問題の解答例	197
	索引	207