

■コンピュータサイエンス教科書シリーズ **12**

人工知能原理 (改訂版)

博士(工学) 加納 政芳

博士(工学) 山田 雅之 共著

博士(学術) 遠藤 守

COMPUTER SCIENCE TEXTBOOK SERIES

コロナ社

コンピュータサイエンス教科書シリーズ編集委員会

編集委員長 曾和 将容（電気通信大学）

編集委員 岩田 彰（名古屋工業大学）

（五十音順）

富田 悦次（電気通信大学）

（2007年5月現在）

刊行のことば

インターネットやコンピュータなしでは一日も過ごせないサイバースペースの時代に突入している。また、日本の近隣諸国も IT 関連で急速に発展しつつあり、これらの人たちと手を携えて、つぎの時代を積極的に切り開く、本質を深く理解した人材を育てる必要に迫られている。一方では、少子化時代を迎え、大学などに入学する学生の気質も大きく変わりつつある。

以上の状況にかんがみ、わかりやすくて体系化された、また質の高い IT 時代にふさわしい情報関連学科の教科書と、情報の専門家から見た文系や理工系学生を対象とした情報リテラシーの教科書を作ることを試みた。

本シリーズはつぎのような編集方針によって作られている。

- (1) 情報処理学会「コンピュータサイエンス教育カリキュラム」の報告、ACM Computing Curricula Recommendations を基本として、ネットワーク系の内容を充実し、現代にふさわしい内容にする。
- (2) 大学理工系学部情報系の 2 年から 3 年の学生を中心にして、高専などの情報と名の付くすべての専門学科はもちろんのこと、工学系学科に学ぶ学生が理解できるような内容にする。
- (3) コンピュータサイエンスの教科書シリーズであることを意識して、全体のハーモニーを大切にするとともに、単独の教科書としても使える内容とする。
- (4) 本シリーズでコンピュータサイエンスの教育を完遂できるようにする。ただし、巻数の制限から、プログラミング、データベース、ソフトウェア工学、画像情報処理、パターン認識、コンピュータグラフィックス、自然言語処理、論理設計、集積回路などの教科書を用意していない。これらはすでに出版されている他の著書を利用していただきたい。

ii 刊 行 の こ と ば

- (5) 本シリーズのうち「情報リテラシー」はその役割にかんがみ、情報系だけではなく文系、理工系など多様な専門の学生に、正しいコンピュータの知識を持ったうえでワープロなどのアプリケーションを使いこなし、なおかつ、プログラミングをしながらアプリケーションを使いこなせる学生を養成するための教科書として構成する。

本シリーズの執筆方針は以下のものである。

- (1) 最近の学生の気質をかんがみ、わかりやすく、丁寧に、体系的に表現する。ただし、内容のレベルを下げることはしない。
- (2) 基本原理を中心に体系的に記述し、現実社会との関連を明らかにすることにも配慮する。
- (3) 枝葉末節にとらわれてわかりにくくならないように考慮する。
- (4) 例題とその解答を章内に入れることによって理解を助ける。
- (5) 章末に演習問題を付けることによって理解を助ける。

本シリーズが、未来の情報社会を切り開いていけるたくましい学生を育てる一助となることができれば幸いです。

2006年5月

編集委員長 曾和 将容

ま え が き

2017 年は、第 3 次人工知能ブームの中にある。

人工知能 (artificial intelligence, AI) という言葉が初めて使用された 1956 年のダートマス会議から第 1 次 AI ブームが始まるが、マービン・ミンスキーが、ニューラルネットワークの最も基本的な「単層パーセプトロン」は線形分離不可能なパターンを識別できないことを示したことなどもあり、1970 年代中ごろには冬の時代を迎えることになる。

その後、1980 年代になると、隠れ層をもつパーセプトロンはその問題を解決できること、ニューラルネットワークの学習アルゴリズム「誤差逆伝播法」が発見されたことから、第 2 次 AI ブームが到来する。この期間には、ニューラルネットワーク以外にもエキスパートシステムによる知識表現が隆盛し、わが国では第五世代コンピュータプロジェクトが推進されるなどの活況の中にあった。しかし、その状況も長くつづかず、およそ 7 年程度で再び冬の時代を迎えることになる。これにはさまざまな理由が考えられるが、その一つに、人工知能の構築に必要な大量のデータがなかったことが挙げられる。

そして、その環境が 2010 年代に激変する。「ディープラーニング (深層学習)」の登場である。大量なデータと、それを処理するのに十分な能力を有するコンピュータが比較的容易に入手できるようになったことがきっかけで、高い精度の学習が可能になったのである。Google 社の AlphaGo が 2015 年 10 月に人間のプロ囲碁棋士に勝利したのは衝撃的な出来事である。現在われわれはこの渦中にいる。

上述の人工知能の歴史は、ニューラルネットワークの視点から記したが、この期間、さまざまな人工知能アルゴリズムが研究されてきた。例えば、探索アルゴリズムは、第 1 次 AI ブームから脈々と研究され、近年では先ほどふれた

AlphaGoにも採用されているモンテカルロ木探索が注目を集めている。第2次AIブームで脚光を浴びたエキスパートシステムでは比較的単純な知識表現構造が用いられていたが、現在では、文書の意味を形式化することでコンピュータによる自動的な情報収集や分析を行うセマンティック Web の研究が盛んに行われている。本書では、人工知能アルゴリズムの中でも特に、探索・ゲーム、機械学習、および知識表現・セマンティック Web 技術に焦点を絞り、平易な文章で解説する。また、読者の理解を助けるために、実際のプログラミングコードも掲載した。本書を読み、人工知能に興味をもち、さらなる勉学を進めるためのきっかけとなれば幸いである。

各章の執筆者はつぎのとおりである。

第 I 部「探索とゲーム」：山田

第 II 部「機械学習」：加納

第 III 部「知識表現」：遠藤

最後に、本書の出版の機会を与えてくださり、種々ご指導いただいた本シリーズの編集委員長 曾和将容 先生、担当編集委員 岩田 彰 先生、ならびにコロナ社には心から感謝申し上げます。

2017 年 9 月

加納 政芳

改訂にあたって

人工知能、機械学習は、技術革新も目覚ましく情報系の中心的立ち位置になりつつある。そこで本書の内容を見直し改訂することとなった。

すでに古くなってきている内容を刷新するとともに、4章に粒子群最適化、新設した第7章にサポートベクターマシンならびにt-SNEについて加筆することで、本書で取り扱う内容の充実を図った。

2024 年 7 月

加納 政芳

目 次

1 人工知能とその歴史

1.1 人工知能とは	1
1.2 人工知能の歴史	3

第I部 探索とゲーム

2 探 索

2.1 状態空間のグラフ表現	8
2.2 深さ優先探索と幅優先探索	10
2.2.1 深さ優先探索	10
2.2.2 幅優先探索	12
2.2.3 プログラム	13
2.2.4 深さ優先探索と幅優先探索の比較	18
2.3 ダイクストラ法	20
2.3.1 プログラム	21
2.3.2 健全性	24
2.4 山登り法	26
2.5 最良優先探索	29
2.6 A^* アルゴリズム	31
2.6.1 プログラム	33
2.6.2 健全性	36
2.6.3 ヒューリスティック関数の精度・無矛盾性	38

2.7 反復深化法と IDA^*	39
2.7.1 深さを閾値とした反復深化法	39
2.7.2 IDA^*	41
演習問題	42

3 ゲ ー ム

3.1 群論によるパズルの分析	44
3.1.1 コマの並びの表現	45
3.1.2 巡回置換による操作の表現	45
3.1.3 等価な巡回置換	47
3.1.4 偶置換・奇置換	48
3.2 ヒューリスティック関数の設計	49
3.3 ゲーム木	52
3.4 AND-OR 木	55
3.5 証明数と反証数	56
3.6 MINMAX 法	60
3.6.1 局面の評価	61
3.6.2 MINMAX 探索	63
3.7 $\alpha\beta$ 法	66
3.8 ゲームプログラミングの進展	71
3.8.1 いろいろな手法	71
3.8.2 パズルやゲームの解を求める試みの事例	73
演習問題	77

第Ⅱ部 機械学習

4 進化的計算

4.1 遺伝的アルゴリズム	79
4.1.1 選 択	82
4.1.2 交 叉	84
4.1.3 突 然 変 異	86
4.1.4 GA による探索の具体例	87
4.2 遺伝的プログラミング	87
4.2.1 選 択	88
4.2.2 交 叉	89
4.2.3 突 然 変 異	89
4.3 差 分 進 化	90
4.4 粒子群最適化	93
4.5 対話型進化計算	95
演 習 問 題	96

5 ニューラルネットワーク

5.1 ニューロンモデル	99
5.2 パーセプトロン	101
5.2.1 誤り訂正学習法	105
5.2.2 誤差逆伝播法	107
5.2.3 誤差逆伝播法の導出	110
5.3 デイプラーニング	113
5.3.1 たたみ込みニューラルネットワーク	113
5.3.2 技術的補足	116
5.4 自己組織化マップ	119

演習問題	121
------	-----

6 強化学習

6.1 強化学習の枠組み	124
6.2 TD 学習	126
6.3 SARSA	134
6.4 Q 学習	137
6.5 適格度トレース	138
演習問題	140

7 その他の機械学習アルゴリズム

7.1 サポートベクターマシン	142
7.1.1 ハードマージン最適化	144
7.1.2 ソフトマージン最適化	147
7.1.3 SVM の非線形化とカーネルトリック	150
7.2 t-SNE	153
7.2.1 SNE	153
7.2.2 t-SNE	156
演習問題	158

第Ⅲ部 知識表現

8 知識表現

8.1 知識とその表現	159
8.2 知識表現技法	160

8.2.1	フレーム	161
8.2.2	意味ネットワーク	163
8.2.3	プロダクションルール	165
8.2.4	スクリプト	167
8.3	推論	168
8.3.1	フレームシステムにおける推論の事例	168
8.3.2	意味ネットワークによる推論の事例	170
8.3.3	プロダクションシステムによる推論の事例	171
8.3.4	スクリプトによる推論の事例	172
8.4	マークアップ言語とメタ言語	173
8.4.1	HTML	175
8.4.2	XML	178
8.5	知識表現とその活用	180
	演習問題	180

9 セマンティック Web 技術

9.1	セマンティック Web 設計の原則と技術階層	181
9.2	スキーマ言語	183
9.2.1	DTD	183
9.2.2	XML Schema	186
9.3	Web におけるメタデータの活用事例	191
9.4	オントロジー	193
9.4.1	RDF	194
9.4.2	OWL	197
9.5	セマンティック Web の応用事例	201
9.5.1	Linked Open Data	201
9.5.2	SPARQL	203
9.6	セマンティック Web の未来	207
	演習問題	210

引用・参考文献	211
索引	214

※ 本書の演習問題解答と解答プログラムは、下記 URL および二次元コードより入手できます。

<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339027235/>



COMPUTER SCIENCE TEXTBOOK SERIES □

1 人工知能とその歴史



1.1 人工知能とは

人工知能 (artificial intelligence, **AI**) という用語は, 1956 年に開催された国際会議「ダートマス会議」において, ジョン・マッカーシーによって提案された造語である。AI は, 元来, 機械 (コンピュータ, ロボットなど) に人と同様の知能を人工的に実現させることを目的とした研究分野[†]であるが, 現在では, ファイナンス, バイオインフォマティクス, 音楽, エンターテイメントなど, 多くの分野にも広く波及しており, 学際的な分野となっている。学際的と称される AI の研究領域には具体的にどのようなテーマがあるだろうか。人工知能学会に投稿される論文の該当分野を以下に示す。

- 基礎・理論
- 機械学習
- データマイニング
- 知識の利用と共有
- Web インテリジェンス
- Web マイニング
- エージェント
- ソフトコンピューティング

[†] もう一つの側面として, 人の知能のメカニズムを解明しようとする科学的な研究分野 (認知科学の一分野) もある。

2 1. 人工知能とその歴史

- 自然言語処理・情報検索
- 画像・音声
- ロボットと実世界
- ヒューマンインタフェース・教育支援
- AI 応用

基礎・理論は、探索や知識表現、推論など、知的な情報処理を実現するための基礎的な研究分野である。機械学習は、明示的にプログラムしなくても学習する能力を機械に与える研究領域であり、基礎・理論と同様に AI の基礎的な分野である。

それ以外の分野は、応用分野に大別される。データマイニングは、膨大なデータから有用な知識を発見するための研究である。知識の利用と共有では、機械内に蓄積されたデータをどのように扱うかを考える分野である。Web インテリジェンス、Web マイニングは、Web をより使いやすくする手法を研究する分野である。エージェントは、人の代わりに作業する機械（ソフトウェアも含む）をエージェントと呼び、エージェントに作業させるための技術やそのあり方を研究する分野である。ソフトコンピューティングは、扱いやすさや頑健性、時間的・メモリ空間的な低コストを実現するために、精密さを過度に求めることを避けた手法を検討する研究である。ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズム、遺伝的プログラミングなどの学習・探索手法をこの分野に含めることもある。自然言語処理・情報検索、画像・音声は、人が日常で使用するメディアを直接扱う研究である。ロボットと実世界は、人の代替として実際にロボットを用いて研究を進める分野である。ヒューマンインタフェース・教育支援は、人と機械が接するデバイス（インタフェース）をどのように設計するか、またインタフェースを通じた支援について検討する分野である。AI 応用は、先に述べたファイナンス、バイオインフォマティクス、音楽、エンターテインメントの他に、産業システム、社会システム、e-コマース、ヘルスケア、マルチメディア、ゲームなどの分野に AI を活用する応用研究分野である。

本書では、応用分野にも広く活用可能な機械学習を含めた基礎分野について

概説することで、AIに関する基礎的な知識を得ることを目指す。

2章「探索」、3章「ゲーム」では、探索に関する知識を深める。探索とは、問題を解く場合にどのような順序で手続きを進めていけばよいかを決定することである。このような手続きが重要になる一つの分野にオセロや将棋といったゲームがある。4章「進化的計算」、5章「ニューラルネットワーク」、6章「強化学習」、7章「その他の機械学習アルゴリズム」では、機械学習について学ぶ。進化的計算は、生物の進化の過程を模してつくられたアルゴリズムで、確率的な探索手法とも学習手法ともいわれる。学習には、明示的な教示を与えて学習する教師あり学習、明示的な教示ではなく出力の善し悪しを与えて学習する強化学習、多数の例から共通の法則を導く教師なし学習などがある。8章「知識表現」、9章「セマンティック Web 技術」では、知識表現に関する理解を深める。知識表現とは、知識をどのような形式で蓄積し、利用するかを議論する分野である。知識表現は、古くはエキスパートシステムや自然言語処理のための知識の表現の基礎となっているが、最近注目されている研究としてセマンティック Web がある。セマンティック Web の目的は、インターネットで Web ページを閲覧する際に、意味の疎通を付け加えることにある。

本書は、上記のように大きく三つの分野をカバーしている。特に2章から順に進み進める必要はないので、読者の興味のある分野から取り組んでいただきたい。

1.2 人工知能の歴史

AIに関する研究が学問分野として確立したのは、1956年のダートマス会議がきっかけである。本節では、1950年代から現在に至るまでのAIの歴史^{ふかん}を俯瞰する。

1950年、アラン・チューリングが、機械が知能をもつかどうかを判定する尺度としてチューリングテストを提案した。また同年、クロード・シャノンによってチェスの最適手を検索するためのアルゴリズムであるMINMAX法が、アイザック・アシモフによってロボット三原則が公開された。その後、アーサー・サミュエルは、1952年に $\alpha\beta$ 法を用いたチェッカープログラムを、1955年にサ

4 1. 人工知能とその歴史

ミュエル自身のプレーを学ぶチェッカープログラムを開発した。1956年、アレン・ニューウェル、ハーバート・サイモンらは、数学の定理を証明するロジックセオリストを開発した。サミュエルのチェッカープログラム、もしくはニューウェルらのロジックセオリストが、最初のAIプログラムといわれている。1958年、ローゼンブラットが脳をモデル化したパーセプトロンを提案した。パーセプトロンは、機械に学習を行わせる研究の発端となり、1960年代に爆発的なニューラルネットワークブームを巻き起こすきっかけとなった。1950年代には、その他にも、ニューウェルとサイモンによって任意の形式化された記号問題を解くプログラムGPS (general problem solver) が(1957年)、ジョン・マッカーシーによってLISP言語が開発された(1958年)。このころは、ゲームプログラミングや記号処理に関する研究が盛んに行われていた。

1960年に入ると、ダニエル・ボブロウが高校レベルの代数問題を解くプログラムSTUDENTを開発した。つづいて、1965年、ジョセフ・ワイゼンバウムがELIZAを開発した。ELIZAは、文字入力によって対話を行うインタラクティブなプログラムである。同年、エドワード・フェイジェンバウムがDENDRALという有機化合物の分子構造を推定するためのソフトウェアを開発した。DENDRALなどの専門家のように振る舞うシステムはエキスパートシステムと呼ばれるが、DENDRALはその最初の例である。同時期には、1963年のウラジミール・ヴァブニクらの報告によって線形サポートベクターマシンが、1966年のロス・キリアンらの報告によって意味ネットワークが広く知られるようになった(1966年)。そして、1969年、マービン・ミンスキーとシーモア・パパートによって、二層構造のパーセプトロンの認識限界を、さらにジョン・マッカーシーとパトリック・ヘイズが、有限の情報処理能力しかない機械は現実に起こりうる問題すべてに対処することができないことを示すフレーム問題を、提起した。これらがきっかけの一つとなって、AIは冬の時代を迎えることとなった。

1971年、テリー・ウィノグラードによって画面の「積み木の世界」に存在するさまざまな物体を言語入力によって動かすことができるシステムSHRDLU

が、さらに1972年、論理型言語 Prolog が開発された。Prolog は、LISP と
らび AI 研究者に広く用いられているプログラミング言語である。また、1975
年に、ジョン・H・ホランドによって遺伝的アルゴリズムが提案された。同年、
マービン・ミンスキーによって、人の記憶や推論の認知心理的なモデルである
フレームが提起された。1979年、ディープラーニングの先駆的研究として、福
島邦彦がネオコグニトロンを発表した。このころの計算機の計算速度やメモリ
は、現代のものと比較して大きく劣っていた。例えば、1975年に発売された
IBM 5100 ポータブルコンピュータは、CPUの動作周波数が1.9 MHz、メモリ
が16~64 kiB (RAM)、32~64 kiB (ROM)、本体の重量が24 kgであった。
このような計算機的な限界によって、理論上は実現可能でも実装不可能な問題
も数多く存在した。

1980年代に入り、日本では1982年に述語論理による推論を高速実行する並
列推論計算機とそのOSを構築することを目標として、第五世代コンピュータ
プロジェクトが開始された(1992年終了)。同年、ジョン・ホップフィールド
によってホップフィールドネットワークが発表された。ホップフィールドネッ
トワークは相互結合回路であり、ネットワークによる連想記憶モデルとして広
く活用された。また、1986年、デビッド・ラメルハートによって誤差逆伝播法
が提案された[†]。誤差逆伝播法は、パーセプトロンの限界を解消するものであ
った。これらの提案によって再びニューラルネットワークが注目を集めること
になった。1986年には、ロドニー・ブルックスによってサブサンクション(包摂)
アーキテクチャが提唱された。こうして1980年代は、ニューラルネットワー
クモデルを活用する研究者の割合が急速に増え、AI研究が活況となった。

1990年、ジョン・コザによって遺伝的プログラミングが提案された。1992
年、強化学習によって強くなるバックギャモンプログラム TD-Gammon がジェ
ラルド・テザウロによって、非線形分類問題にも適用可能な特徴空間上で分離
を行うサポートベクターマシンがヴァブニクらによって発表された。1997年、
チェスプログラム DeepBlue がチェスチャンピオンのガルリ・カスパロフに、

[†] 日本では、1967年に甘利俊一が発表している。

索引

<p style="text-align: center;">【あ】</p> <p>アウル 197 誤り訂正学習法 105 暗黙知 160</p> <p style="text-align: center;">【い】</p> <p>石取りゲーム 53 一様交叉 85 一点交叉 84 イテレーション 117 遺伝子型 79 遺伝子座 80 遺伝子長 80 遺伝的アルゴリズム 79 遺伝的操作 82 遺伝的プログラミング 87 意味ネットワーク 161, 163 入れ子構造 177 インスタンスフレーム 162 インタプリタ 166, 168</p> <p style="text-align: center;">【う】</p> <p>後ろ向き推論 172</p> <p style="text-align: center;">【え】</p> <p>エージェント 124 枝 9 エッジキューブ 73 エピソード的タスク 127 エポック数 117 エリート数 83 エリート戦略 83</p>	<p style="text-align: center;">【お】</p> <p>オブジェクト 166 オープンガバメント 207 オープンデータ 201 オープンリスト 13 親子関係 11 オントロジー 193 ——の定義 194 オントロジーヘッダ 197</p> <p style="text-align: center;">【か】</p> <p>下位概念 162 階層構造 164 外部サブセット 184 ガウスカーネル 95, 151 学習者 124 学習率 106 確定ゲーム 53 確率的勾配降下法 116 隠れ層 101 活性化関数 100 カーネル関数 95, 151 カーネルトリック 151 環境 124 慣性項 110 慣性率 110 間接照合 170 完全情報ゲーム 53</p> <p style="text-align: center;">【き】</p> <p>木 9 奇置換 48 逆位 90 逆元 46</p>	<p>吸収状態 130 吸収壁 130 強化学習 124 競合解消 171 競合学習 120 教師あり学習 119 教師信号 95 教師なし学習 119 兄弟関係 11 共通語彙基盤 203 局面表 72</p> <p style="text-align: center;">【く】</p> <p>偶置換 48 クエリ 204 クラス公理 197, 198 クラスタリング 142 クラスフレーム 162 クラス分類 142 グラフ 9 グリーディ方策 134 クローズドリスト 13 グローバルベスト 93 群 46</p> <p style="text-align: center;">【け】</p> <p>形式知 160 形式ニューロン 100 継承 170 経路 9 結合重み 100 決定境界 142, 143 ゲーム木 54 健全 24</p>
--	---	--

【こ】

交 叉 84, 89, 91

構造的性質 164

行 動 124, 171

行動価値 134

公 理 200

互 換 48

誤差逆伝播法 105, 107

個 体 200

——の記述 197

個体値型プロパティ 199

コーナーキューブ 73

混雑問題 157

【さ】

最新優先 171

最大プーリング 115

最良優先探索 29

作業域 165, 166

サーバント 161

差分学習 127

差分進化 90

サポートベクター 144

サポートベクターマシン 142

参照ベクトル 119

【し】

次元削減 142, 153

自己組織化マップ 119

事 実 166, 200

次状態 124

実数値 GA 90

収 益 127

集団サイズ 81

出力層 101

巡回置換 45

循環路 9

上位概念 162

条件照合 171

勝者ユニット 120

詳述優先 171

状 態 124

状態価値 126

状態空間 9

証明集合 58

証明数 56

証明数探索 59

人工知能 1

深層学習 113

シンプル DC 196

【す】

推 論 168

推論機構 166

スキーマ 183

スキーマ言語 183

スクリプト 161, 167

スラック変数 148

スロット 161

スロット値 161

スロット名 161

【せ】

性質属性 165

性質の継承 164

静的評価 61

静的評価関数 61

静的評価値 62

セマンティック Web 181

——の概念 182

セマンティック Web 技術 181

ゼロパディング 114

ゼロ和ゲーム 52

遷移確率 130

線形探索 8

全結合 113

宣言的知識 159

センターキューブ 73

選 択 82, 88, 92

【そ】

双対問題 145, 149

双方向推論 172

属 性 166

属性継承 170

属性値 166

ソフトマージン最適化 148

ソフトマックス手法 134

損失関数 107

【た】

ダイクストラ法 20

対立遺伝子 80

対話型進化計算 95

多重継承 170

多層パーセプトロン 101

たたみ込み 113

たたみ込みニューラルネットワーク 113

多点交叉 85

単位元 46

探 索 7

探索木 11

単純型 188

単層パーセプトロン 101

【ち】

知識表現 159

超平面 143

直接照合 170

【て】

定義属性 165

定数節点 88

ディープラーニング 113

適格度トレース 139

適合度 80

適用制限 172

データ駆動型推論 172

データ値型プロパティ 199

データ連携基盤 209

手続き的知識 160

デフォルト値 165

デーモン 161

展開する 13

転 換 90

伝達関数 100

	【と】	ヒンジ損失	95, 149		【み】		
動的評価	61				水差し問題	12	
特徴空間	150	【ふ】			ミニバッチ学習	117	
突然変異	86, 89, 91	ファーストマッチ	172				
突然変異率	86	ファセット	161		【む】		
トーナメント方式	83	ファセット値	161		無矛盾	38	
トリプル	194	ファセット名	161				
ドロップアウト	118	深 さ	11		【め】		
		深さ優先探索	11		メタ言語	159, 174	
		複合型	188		メタデータ	174	
【な】		プーリング	115				
内部サブセット	184	プレイアウト	72		【も】		
		フレーム	160, 161		目標駆動型推論	172	
【に】		フレーム問題	163		モーメンタム	110	
二点交叉	84	プロダクションシステム	165		モンテカルロ木探索	72	
入力層	101	プロダクションルール	161, 165		モンテカルロ法	128	
【の】		プロパティ公理	197, 199		【や】		
ノード	9, 163	文書型定義	183		山登り法	26	
		【へ】			【ゆ】		
【は】		平均プーリング	115		有限ゲーム	53	
葉	11	閉路	9		有向グラフ	9	
バイアスユニット	103	ヘックス	74		ユニット	100	
パーセプトロン	101	ベルマン方程式	130		ユニット数	119	
パーソナルベスト	93	変数節点	88		【よ】		
発火	172	【ほ】			要素型宣言	185	
バックプロパゲーション法	107	方策オフ型学習	137		【ら】		
		方策オン型学習	135, 136		ラグランジュの未定乗数法	144	
バッチ学習	116	報酬	124		ラベル付き有向グラフ	163	
バッチサイズ	117	歩道	9		ランキング方式	83	
ハードマージン最適化	145	【ま】			ランダムウォーク問題	130	
幅優先探索	13	前向き推論	172		【り】		
ハミング距離	87	マークアップ言語	159, 173		粒子群最適化	90	
反証集合	58	マージン	143		リンク	9, 163	
反証数	56	マスク	85		隣接する	9	
反復深化 $\alpha\beta$ 探索	72	マスクパターン	85				
反復深化法	39	マッシュアップ	209				
【ひ】		マルコフ決定過程	125				
非線形 SVM	150, 153	マルコフ性	125				
ヒューリスティック	26	マンハッタン距離	49				
ヒューリスティック関数	26						
表現型	80						

<p>【る】</p> <p>ルート 11</p> <p>ルービックキューブ 44, 73</p> <p>ルールベース 165, 166</p> <p>ルール優先順位 172</p>	<p>ルーレット方式 82</p> <p>【れ】</p> <p>例 外 171</p> <p>例外処理 171</p> <p>レストランスクリプト 168</p>	<p>連結グラフ 9</p> <p>連続タスク 127</p> <p>【わ】</p> <p>割引収益 127</p> <p>割引率 127</p>
◇ ◇		
<p>【A】</p> <p>A* アルゴリズム 31</p> <p>actor-critic 133</p> <p>AdaGrad 117</p> <p>Adam 117</p> <p>AI 1</p> <p>AND-OR 木 55</p> <p>AND ノード 55</p> <p>AND 分岐 55</p> <p>Atom 191</p> <p>【C】</p> <p>CNN 113</p> <p>【D】</p> <p>DAML-ONT 197</p> <p>DCMES 196</p> <p>DCMI 196</p> <p>DE 90</p> <p>DOCTYPE 宣言 184</p> <p>DTD 183</p> <p>Dublin Core 196</p> <p>【G】</p> <p>$g(n)$ 20</p> <p>$\hat{g}(n)$ 20</p> <p>GA 79</p> <p>GP 87</p> <p>GTYPE 79</p> <p>【H】</p> <p>$h(n)$ 26</p> <p>$\hat{h}(n)$ 26</p> <p>HTML 174, 175</p>	<p>HTML5 175</p> <p>【I】</p> <p>IDA* 41</p> <p>【K】</p> <p>KL ダイバージェンス 154</p> <p>KR 159</p> <p>【L】</p> <p>LD 201</p> <p>LinkData 208</p> <p>Linked Data 201</p> <p>Linked Open Data 201</p> <p>LOD 201</p> <p>L_p プーリング 115</p> <p>【M】</p> <p>MAX ノード 62</p> <p>MAX プレーヤ 61</p> <p>MDP 125</p> <p>MINMAX 探索 63</p> <p>MINMAX 法 60</p> <p>MIN ノード 62</p> <p>MIN プレーヤ 61</p> <p>【N】</p> <p>Negamax 法 71</p> <p>【O】</p> <p>OAV 形式 166</p> <p>OIL 197</p> <p>Ontolingua 197</p> <p>OR ノード 55</p> <p>OR 分岐 55</p>	<p>OWL 197</p> <p>OWL オントロジー 197</p> <p>OWL 文書 197</p> <p>【P】</p> <p>Perplexity 尺度 154, 157</p> <p>PSO 90</p> <p>PTYPE 80</p> <p>【Q】</p> <p>Q 学習 137</p> <p>【R】</p> <p>RDF 194</p> <p>RDF/XML 195</p> <p>RDF グラフ 194</p> <p>RNN 116</p> <p>RSS 191</p> <p>RSS フィード 192</p> <p>RSS リーダ 192</p> <p>【S】</p> <p>SARSA 134</p> <p>SGD 116</p> <p>SGML 178</p> <p>SMO 147</p> <p>SNE 153</p> <p>SOM 119</p> <p>SPARQL 203</p> <p>SPARQL endpoint 204</p> <p>SVG 174</p> <p>SVM 142</p> <p>【T】</p> <p>t-SNE 153, 157</p>

TD 学習	126			$\alpha\beta$ 探索	68
TD 学習アルゴリズム	128		【W】	$\alpha\beta$ 法	66
TD 誤差	126	World Wide Web	174	β カット	67
TeX	174		【X】	ϵ -グリーディ方策	135
t 分布	157			1 ステップダイナミクス	125
				5 ★オープンデータ	202
【U】		XML	178	8-パズル	8, 44
URI 参照	195	XML Schema	183, 187		
			【その他】		
【V】		α カット	67		
VRML	174	$\alpha\beta$ カット	68		

— 著者略歴 —

加納 政芳 (かのう まさよし)

- 1999年 名古屋工業大学工学部知能情報システム学科卒業
- 2001年 名古屋工業大学大学院博士前期課程修了 (電気情報工学専攻)
- 2004年 名古屋工業大学大学院博士後期課程修了 (電気情報工学専攻), 博士 (工学)
- 2004年 中京大学講師
- 2010年 中京大学准教授
- 2015年 中京大学教授
- 現在に至る

山田 雅之 (やまだ まさし)

- 1992年 名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業
- 1994年 名古屋工業大学大学院博士前期課程修了 (電気情報工学専攻)
- 1994年 名古屋工業大学助手
- 1998年 中京大学助手
- 1999年 博士 (工学) (名古屋工業大学)
- 2007年 中京大学准教授
- 2012年 中京大学教授
- 現在に至る

遠藤 守 (えんどう まもる)

- 1997年 信州大学工学部情報工学科卒業
- 1999年 名古屋大学大学院博士前期課程修了 (物質・生命情報学専攻)
- 2003年 名古屋大学大学院博士後期課程修了 (物質・生命情報学専攻), 博士 (学術)
- 2003年 中京大学講師
- 2008年 中京大学准教授
- 2014年 名古屋大学准教授
- 現在に至る

人工知能原理 (改訂版)

Principles of Artificial Intelligence (Revised Edition)

© Kanoh, Yamada, Endoh 2017, 2024

2017年12月15日 初版第1刷発行

2024年9月30日 初版第5刷発行 (改訂版)

検印省略

著者 加納政芳
山田雅之
遠藤守
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 978-4-339-02723-5 C3355 Printed in Japan

(新井)



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。