

まえがき

1. 高名だが年老いた科学者が「可能である」といったとき、それはほぼ正しい。「不可能である」といったときは、まず間違っている。
2. 可能性の限界を発見する唯一の方法は、不可能とされるところまでやってみることである。
3. 十分に発達した科学技術は、魔法と区別がつかない。

[SF 作家 アーサー・C・クラークの 3 法則]

本書は人工知能と人工生命における基本手法の実践的な入門書である。アルゴリズムや生物学の知識を前提としないビギナー向けに、基礎的な部分から、最近の話題（モンテカルロ木探索、遺伝子ネットワークや合成生物学など）に至るまでをわかりやすく解説する。幾何学の定理証明から SNS の理論的解析まで内容は多岐にわたるが、必ずしもすべての分野を網羅的にカバーしていない。人工知能に関する解説本はすでに多く出版されているので、むしろこれまで筆者が興味を持ち研究してきたことを中心に記述すべく努めた。後述するように若い人々への刺激となることを期待するからである。

本書は初心者（大学の学部生）から大学院生を対象としているが、もともとなったのは、筆者の大学での「人工知能」や「システム工学基礎」などの講義ノートである。講義の運営に協力してくれた、東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻 伊庭研究室のスタッフの方々および学生の皆さんに厚くお礼を申し上げる。さらに、本書で説明するトピックに関連したプログラム作成に協力してくれた学生の皆さん、なによりも面白いレポート作成に尽力してくれた受講生の皆さんに深く感謝する。

また、本書の 3 章と 4 章の一部は、筆者のかつての連載や前著^{14), 17)}†に関連している。この執筆には読者からの反響が少なからずあり、貴重な意見や拡張の示唆をいただいた。そのため、本書ではこのコメントを反映して加筆・修正を大幅に加え、例

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

題やトピックを選び直して、内容を再構成した。このこと自体が人工知能という分野における温故知新の証左であろう。人工知能技術や探索技法を最初に解説する機会を与えてくれた出版社の方々、およびコメントをいただいた読者に謝意を表したい。

本書の各章は基本的に独立して読めるように書かれている。そのため、興味を持ったトピックから読み始め、後に他の章に進むことをお勧めする。以下、各章の概要について説明する。1章では、人工知能という学問の歴史的背景と批判的議論について説明する。知能に関する理論は現在でもさまざまな形で論争になっており、その活発な議論と理論の戦いこそが人工知能研究の存在理由であると考えられる。2章では幾何学的推論のための代数的手法について説明する。一見この章は難解でとっつきにくく思われるかもしれないが、直ちにはあきらめないでほしい。ここで用いられる手法は多項式の四則演算（特に割り算）でしかなく、高校程度の知識でも十分に理解できるはずである。もちろんその奥には深遠な理論が広がっているが、ロボティクスの問題や幾何学の入試問題を解くことで有効性がわかるであろう。3章では、昔から盛んに研究されたゲームやパズルの探索について解説する。ここでは古典的な探索アルゴリズムを実際のパズルやゲームで説明するとともに、近年囲碁などの大規模なゲームに適用されているモンテカルロ木探索について説明する。4章では、確率的な探索手法であるニューラルネットワークについて説明する。古典的なパーセプトロンとその限界についての歴史的話題から、最近注目されている深層学習までをカバーしている。ゲームと同じ問題も扱っているので、3章での結果と比較してほしい。5章では、WWWにおける人工知能の技術について解説する。この分野の発展は目覚ましいが、GoogleのPageRankのアルゴリズムはネットワークのダイナミクスの観点からも理解しておく価値がある。6章では、遺伝子ネットワークをめぐる話題について解説する。このテーマは人工生命や合成生物学における進化発達(Evo-Devo)アプローチとしても注目されている。最近では、人工知能への応用が盛んになされるようになり、ロバスト性や適合性においてその有効性が示されている。以上の説明からわかるように、本書全体としての流れは、人工知能の古典的アプローチや探索手法から始まり、つぎにその後提案された確率的な手法、そしてこの10年間で発展が目覚ましいWWWや集合知を経て、より最近の人工生命や合成生物学の概説に至る。つまり、人工知能の時系列的な発展をなぞるように構成している。これはまた、筆者自身の研究の歴史でもある。

筆者がかつて所属していた学生時代の研究室（東京大学大学院 工学系研究科 情報工学専攻 井上研究室）や電子技術総合研究所の方々との人工知能と人工生命をめぐる哲学的で楽しい議論と挑戦が、本書の中核となっている。当時、研究室では研究とも『遊び』ともつかないことが日常的に行われていた。夜遅くまで些細なことで議論したり、中学校の入試レベルに一見思える問題を徹夜で考えて新しい定理を作ったり、博士論文の締め切りが近いのにトイプロブレムのためのプログラムを皆で書いて競い合ったり、端末に向かって英単語のクイズを何時間も考えたり、時に哲学的に深淵な論争に耽ったり…。幾何学的推論の実験（2章）の多くの題材は、紛れもなくこうした経験の産物である。「へえ、まだ解けないの？」という嘲笑を何度も浴びながら、そのたびに新しい手法と効率化を考案し、再び挫折してはまた思いついた改良を加える。人間に解けた問題が、なぜ人間によって考案されたプログラムで解けないのか？賢く解くためには一体どんなヒューリスティクスがいるのか？アシモフのロボット工学の3原則や、冒頭に引用したアサー・クラークの3法則について議論した経験がなければ、人工知能を研究する資格がないといわれたものである。この場を借りて、かつて『遊び』につきあってくれた先生方と先輩・後輩および同僚の皆さまに深く感謝する。また、これからもこうした議論や『遊び』を楽しんでくれる若人の登場を待ち続けたい。

謝辞として最後になるが、再び言おう。筆者は大学院時代の研究生生活をけっして忘れることはないであろう。特にあの充実した数年間を。なにかを知りたい、研究室には必ずなにかあると思って毎日来るのが楽しかったことを。その喜びをともに分かち合った人々、一時期でも研究をともにした、あの「魅せられた魂（ロマン・罗兰）」たち。その一人ひとり名前を挙げることはできないが、彼らに心から感謝の意を表す。まさに得がたい人々であった。あのような素晴らしい人々を同僚として再び得ることは、あのような「快い緊張を与えてくれる課題（ゲーテ）」を得ることは、もはやないであろう。

末筆ながら、いつも生活を陰ながら支えてくれた妻 由美子、子供たち（滉基、滉乃、滉豊）に心から感謝する。

2014年6月 地球上の最古の生物がみられるハミングプールと EXM にて

目 次

1. 人工知能とは

1.1 AIの歴史と概観	1
1.2 知能ロボットと包摂アーキテクチャ	3
1.3 AIの論争と最近の展開	11

2. 幾何学的推論

2.1 代数的な証明手法	16
2.2 Gröbner 基底	18
2.3 QE	31
2.4 Wuの定理と定理証明システム	37
2.5 Wuの定理に基づく幾何学的推論システム	46
2.5.1 フェーズ I: 記号論理的記述の数式への変換	49
2.5.2 フェーズ II: Wuの手法に基づく推論	54
2.5.3 フェーズ III: 数学的知識を用いた推論	54
2.5.4 フェーズ IV: 記号的記述への逆変換	55
2.6 軌跡問題の解法	56
2.7 作図問題の解法	60

3. ゲームやパズルの探索

3.1 木の探索	69
3.2 深さ優先探索	73

3.3	広さ優先探索	80
3.4	A* 探索	85
3.5	制約充足と画像理解	92
3.6	ゲームの木の探索	97

4. 確率を用いた学習と探索

4.1	確率的な探索法	111
4.2	パーセプトロン	112
4.3	ニューラルネットワーク	124
4.3.1	ホップフィールド型ネットワーク	126
4.3.2	階層型ネットワーク	138
4.4	焼きなまし法とボルツマンマシン	142

5. ウェブという知能

5.1	リンク解析とページランク	153
5.1.1	ハブとオーソリティ	153
5.1.2	InfoSpiders	158
5.1.3	ページランク	165
5.2	ランキング学習	171
5.3	WWWにおける金融テキストマイニング	185

6. 遺伝子ネットワーク

6.1	遺伝子ネットワークとはなにか	189
6.2	遺伝子ネットワークの推定	195
6.3	遺伝子ネットワークのAIへの応用	198
6.3.1	GRNによる複数ロボットの協調	199

6.3.2	GRN によるヒューマノイドロボットの動作生成	203
6.3.3	GRN による画像処理	209
6.3.4	GRN によるアーキテクチャ設計	210
6.3.5	GRN によるエージェントの形態形成	214
6.4	合成生物学と遺伝子ネットワークの設計	218
引用・参考文献		232
索引		245

1

人工知能とは

1.1 AIの歴史と概観

AI (artificial intelligence; 人工知能) という言葉が誕生したのは、1955年のダートマス会議のときである。この会議には、ミンスキー (Marvin Minsky), マッカーシー (John McCarthy), サイモン (Herbert Alexander Simon), ニューウェル (Allen Newell) ら、その後の AI 研究の中心となる人々が多数参加していた。

初期の AI では、ゲームと定理証明が盛んに研究された。その後、推論学習、問題解決、画像理解、自然言語理解、エキスパートシステムなど、より実世界と結び付いた研究がなされた。さらに、認知科学 (人間の心の仕組みを、「知」を中心に解明する分野)、知識工学 (人間の持つ知識を工学目的でコンピュータに乗せることを目指す分野) など、AI と接点をなす学問領域も確立されていった。

初期の AI 研究には、三つの大きな潮流がある²⁸⁾。第一は 1940 年代後半からの論理的思考理論に基づくもので、Prolog のような述語論理型言語における研究につながった。第二は 60 年代からのニューラルネットワークのアプローチ (コネクショニズム) であり、そして第三は 50 年代からのヒューリスティック (発見的手法) なアプローチである。

AI の研究が発展するにつれて、初期の楽観主義にかげりが見え始め、さまざまな批判や挑戦がなされるようになった。例えば上に述べた三つの手法についても、論理的手法では人間のような柔軟な思考が扱えない、コネクショニズムでは高レベルの知識が表現しにくい、ヒューリスティクスはアドホックである、といった批判がなされている。

AI は学際的な分野であり、「知能」というキーワードをもとに、心理学、工学、情

報科学、数学、哲学、脳科学など、さまざまな分野と関係を持つ。より正確には、この関係が AI そのものである。心理学における AI の祖といえば、ピアジェ (Jean Piaget) とフロイト (Sigmund Freud) である。ピアジェは実証的な発達研究を通じて子供の知識獲得に関する先駆的研究を行った。彼の著書「知能の誕生」は、認識における構造化の役割を強調しており、AI への影響は少なくない。ピアジェは、思考の発達ではしだいに新しい構造ができてくるという思考発達段階説を提唱した。子供が発達するためには、いろいろな遊びを通して論理的な組み合わせを試し、その中から知識を得るという説である。これを構成主義と呼ぶ。また、フロイトは精神分析学の創始者であり、自我や無意識に関して独創的な優れた理論を提唱した。

一方で、フロイトやピアジェの理論はすでに否定されたという主張もある²³⁾。例えば、古生物学者の S. J. グールド (Stephen Jay Gould) は、フロイトの理論 (性的発達段階や神経症患者の解釈) が生物学の反復説^{†1}やラマルク説^{†2}を反映したものであるとしている。そのため、これらの二つの説が否定されるとともに、フロイトの理論も減り去ったと述べている^{22, 8 章})。また、スティーブン・ピンカー (Steven Arthur Pinker) は進化心理学者の立場から、「私たちが進化してきた環境の中で、心がなにをするようにデザインされたかを理解しなければならない」と主張し、教育におけるピアジェ理論の弊害をつぎのように説明する^{23, p.135)}。

スイスの心理学者ジャン・ピアジェが子どもを小さな科学者になぞらえて以来、心理学者は一般の人間を研究者になぞらえてきた。(中略) しかし自然淘汰は私たちを、科学で好成績をおさめたり、査読のある専門誌に論文を発表したりするようにつくりあげたのではなく、周囲の環境を熟知するようにつくりあげた。

つまり、小さな数や簡単な計算の直感を除いて、子供は自然発生的に数学の概念を扱えるようにはならない。同じように、子供に読み方を学ばせるときに、「読むことは自然に発達する人間の本能である」と仮定し (この仮定は進化心理学的に証明

^{†1} 系統発生は個体発生を繰り返すというヘッケルの説。動物は胚から成長する過程で、進化で辿った道筋を繰り返す。例えば、ヒトの胚に見られるさい裂は魚だった時代の名残であり、後に吸収される胚のしっぽは両生類の祖先の名残だと考える。現在では否定されているが、都市伝説のように残っている。

^{†2} 獲得形質が遺伝するという考え方。これも遺伝学の知見から否定されている。

されていない), テキストの豊富な対人的環境に子供を置けばそれでよいという構成主義の方法は正しくない。進化認知科学の分野でも, 「人間のゲノムや生物学的機能に基づかない認知科学はあり得ない。人間の認識の仕組みは, 脳の進化と無関係ではない」とされている^{21, p.237})。ただし, こうしたピンカーらの議論への反論もなされている。

このように, 知能に関する理論は, さまざまな形で議論の対象になっている。活発な議論と理論の戦いこそが AI 研究の真髄である。

AI においては, 知能の定義, 知識の表現方法, 研究思想, 実現可能性をめぐって哲学的・心理学的論争が絶え間なくなされ, 論客には事欠かない。有名なものとしては, ドレイファス (Hubert Dreyfus) による反 AI 論 (AI が 20 世紀以前の伝統的哲学と同一の不十分な人間理解を前提としていることから, AI 研究の限界を主張した), ワイゼンバウム (Joseph Weizenbaum) による倫理的 AI 批判 (AI などやってはいけない), ウィノグラード (Terry Winograd) とペリー (John Perry) による論争 (表現主義と合理主義をめぐる哲学的論争), チョムスキー (Noam Chomsky) の生得仮説 (人間は生まれながらにして言語能力や普遍文法を持つという考え) についての論争, コネクショニズムをめぐる論争などがある (これらの詳細は, 文献 19) を参照されたい)。

AI の発展を支えるのは, こうした AI 研究者と反 AI 論者, あるいは立場の異なる AI 研究者の間でなされる激しい議論の応酬がもたらす活気である。

1.2 知能ロボットと包摂アーキテクチャ

ブルックス (Rodney A. Brooks) は, 自律移動ロボットの行動計画のために, 包摂アーキテクチャ (subsumption architecture; SSA) というアプローチを提唱した^{54), 55)}。この手法では, 問題を非同期的な部分タスクを遂行する行動 (task achieving behavior; TAB) に分割する。TAB の例としては, 物体を通過する行動, うろつき回り (逍遙), 探索行動, 物体の同定などがある。これらは単独で非同期的に動作し, それぞれの行動は弱く関連している。さらに, 各 TAB は直接外界と結合し, センサとアクチュエータを有している。古典的なロボットのアプローチと違い, SSA にはつぎのような利点がある。

4 1. 人工知能とは

- (1) 複雑な問題に対しても、独立に TAB を増やしていくことで対処可能である。
- (2) 一部分に誤りがあったとしても、全体としては影響を受けにくい (fault-tolerant)。

本節では、包摂アーキテクチャについて説明する (以下の記述は文献 55) をもとにした)。

ロボットや AI の古典的研究では、問題をつぎのような部分に分けていた。

- (1) センサによるセンシング
- (2) センサからのデータのモデル表現への変換 (モデリング)
- (3) プランニング
- (4) タスクの実行

これは問題を垂直方向に分割する (図 1.1)。分割全体は、センシングにより環境から入ってロボットを通り、行動によって環境に戻っていくという情報の流れを構成する。これは閉じたフィードバックである (各部分問題は内部に別のフィードバックを含んでいる)。ロボットの行動が可能なように各部を実現する必要がある。特定の部分に変更を加える場合には、隣接する部分が変化しないように留意するか、もしくは必要な機能の自動的変更が可能なように設計しなくてはならない。

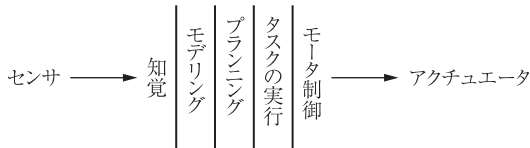


図 1.1 機能モジュールへの移動ロボット制御システムの伝統的な分割

ブルックスは上の方式をとらずに問題を水平に分割して、基本分割を図 1.2 のように構成した。解法に用いる内部構造で問題を分割せずに、ロボットシステムのタスクから見た望ましさをもとに問題を分割している。

このために、ロボットの能力レベルを定めて、ロボットにとっての望ましい行為を規定する。高位の能力レベルほど、より特定の行為に限定される。

SSA ではつぎの能力レベルを用いる。

レベル 0 物体の状態 (動作中/静止) に関係なく、物体との接触を回避する。

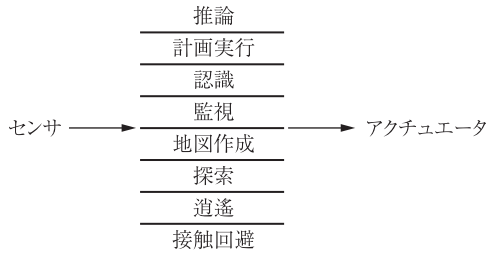


図 1.2 タスク達成のための行動に基づいた
移動ロボット制御システムの分割

- レベル 1 物体を避けながら無目的に動き回る（追従）。
- レベル 2 意味ある前方の物体を観察して環境を「探索」する。
- レベル 3 環境の地図を作り，ある場所から別の場所へ行く道筋を計画する。
- レベル 4 「静的」環境内の変化を監視する。
- レベル 5 既知の物体をもとにして環境を認識し，特定の物体に関するタスクを遂行する。
- レベル 6 環境の変化を伴う計画を記述し実行する。
- レベル 7 環境内の物体の行動を推論し，それに従って計画を修正する。

各能力レベルがより下位の能力レベルを部分集合として含むことに注意してほしい。能力レベルは有効な行動のクラスを規定するので，高次の能力レベルは，そのクラスへの付加的な制約を課すことになる。

各能力レベルに対応する制御システムの層が構築可能であり，新しい層の付加により全能力の向上が容易であることは重要である。

最低レベルの能力を有する，完全なロボットシステムの構築から始めよう。デバッグが終わったら，決してそのシステムを変更しない。これをレベル 0 の制御システムと呼ぶ。つぎに別の制御層を構築し，これをレベル 1 の制御システムと呼ぶ。レベル 1 のシステムは，レベル 0 のシステムのデータを吟味することができる。さらに，レベル 0 の内部インタフェースにデータを埋め込んで，通常データフローを抑制することもできる。この層は，レベル 0 の層の機能を利用してレベル 1 の能力を達成する。一方，レベル 0 の層は，時折データ路に干渉してくる上位層にはまったく気づかずに動作し続ける。同じ過程を繰り返して，図 1.3 のような高次の能力

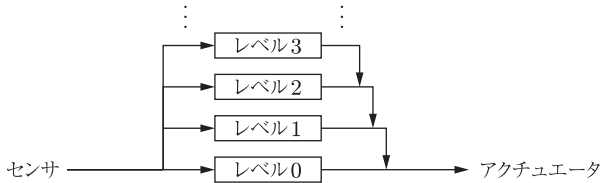


図 1.3 制御の層構造

を達成する。この図で、高次の層は低レベルの役割を包摂して制御を実現する。このシステムはどのレベルでも分割可能であり、下位層のみでも完全な制御システムを構成する。このような意味から、ブルックスが提唱したアーキテクチャは、包摂アーキテクチャ (SSA) と呼ばれる。

SSA の方式を用いると、開発の初期段階で動作するロボット制御システムが利用可能となる。つまり、レベル 1 の層を作ると同時にシステムは動作する。付加的な層はあとで加えればよく、以前に動作していたシステムを変更する必要はない。

このアーキテクチャによると、ロボットや AI における諸問題を以下のように自然な形で解決できる。

多重ゴール 各層は自身のゴールを目指して並列的に動作する。その際個々の行動を仲介するのが抑制機構である。SSA 方式の利点は、どのゴールを追求すべきかの決定を早い時点でしなくてよいことである。ある結論に至るまでゴールのすべてを同時に追求することができ、その結果を究極的な決定に用いることができる。

多重センサ SSA アーキテクチャを用いることで、センサ融合の問題を無視できる。用いるすべてのセンサが中心的な役割を果たす必要はない。信頼できるセンサのみを知覚処理の中心とすればよい。その一方で他のセンサからの値も用いることができる。別の層では複数のセンサ情報を融合して処理を行い、ゴール達成に用いてもよい。つまり、センサ情報の扱い方は各層で独立に決定できる。

ロバスト性 多重センサをうまく用いると、システムの頑強さ (ロバスト性) を増すことができる。さらに、包摂アーキテクチャにおいては、つぎの方法でもロバスト性を増やせる。デバッグの終わった下位レベルは、高次のレベルが付け加えられても動作し続ける。高次のレベルは積極的に低レベル

の出力に干渉して抑制することが可能である。したがって、低レベルはつねに結果を出し続けることができる。

拡張可能性 拡張性を実現する方法は、新しい層を独自のプロセッサ（処理システム）上で実行することである。層間の通信がほとんど不要なので、SSA方式ではこの独自実行が可能である。さらに個々の層は緩い結合のプロセッサ間で分散可能である。

ブルックスは SSA に基づく移動ロボットの制御システムを実現した。以下では、レベル 0, 1, 2 の能力の例を説明しよう。

制御の最低レベルは、ロボットが他の物体と接触しないための機能を実現する。そのためレベル 0 の能力である。図 1.4 を見てほしい。何物かがロボットに近づくと、ロボットは動いて逃げる。もし自分が動いているときに物体に衝突しそうになると、ロボット自身が止まる。動いている障害物からロボットが逃れるには、この二つの方略で十分であり、静止している物体を回避するための動作も実現する。これらの方法を統合すると、ほとんど調整されていなくとも、ソナーと広範囲の反発機能さえあれば適切に行動するロボットになっている。もちろん理論的にはロボットは完璧ではなく、物体が非常に速く移動する場合や散らかった環境における衝突は避けられない。このロボットは何時間もの自律移動の間、動いている障害物にも、また固定した障害物にも衝突しなかった。特に前者に対しては注意深くゆっくりと動いていた。

ここで包摂アーキテクチャの図の見方を説明する。このアーキテクチャは、内部

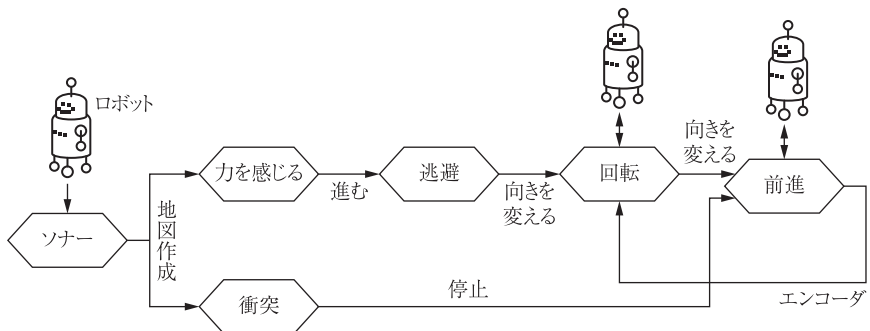


図 1.4 レベル 0 の制御システム

索 引

【あ】	
アーキテクチャ設計	210
アーク	72, 192
アクチベータ	191
アクチュエータ	202
圧縮率	151
後戻り	76
アトラクタ	194
アルバス	113
アルファ値	102
アルファ・ベータカット	101
安定性	206
【い】	
囲碁	106
位置変数	28
位置モデル	176
一様分布	163, 166, 168
一般化能力	132
一本鎖オリゴヌクレオチド	219
イデアル	17, 18, 25
遺伝子	189
遺伝子回路	219
遺伝子型	161, 162, 210, 217, 222
遺伝子工学	218
遺伝子制御ネットワーク	191
遺伝子生成物	214
遺伝子調節タンパク	229
遺伝子重複	192
遺伝子テンプレート	219
遺伝子ネットワーク	18, 189
—の推定	195
遺伝子発現	190, 214

遺伝子発現測定技術	196
遺伝子発現レベル	201
遺伝的アルゴリズム	10, 197
遺伝的形質	189
遺伝的プログラミング	10, 180, 197
伊藤正男	113
意味論	49
イメージ圧縮	209
医療	218
因果関係	18
因果性解析	185, 187
因数分解	46, 54
インタフェース	202
イントロン	190
【う】	
ウイノグラード	3
ウェット実験	197
ウェブページ	171
後ろ向き推論	46
【え】	
エキスパートシステム	1
エクソヌクレアーゼ	220
エージェント	158, 163, 199, 214
エッジ	72, 192, 198, 220
エネルギー	128, 143, 150, 158, 161
—の得失	162
エルゴード的マルコフ連鎖	168
エンコーダ問題	148

【お】	
オイラー	70
オイラー定数	147
凹の稜	93
オオカミとヤギとキャベツの問題	69, 74, 82
オクタント	94
オセロ	104
オーソリティ	153, 169
オペレータ	191
重み	138, 147, 150, 151, 163, 171, 221
重み付き和	125
重みベクトル	114, 115
親	73, 154, 165
オリゴヌクレオチドチップ	195
温度	144, 145
温度スケジューリング	147
【か】	
回帰	198
回帰木	176
解析幾何	31
解析的関数	202
階層型ネットワーク	126, 138
階段関数	143
外適応	192
回避モジュール	8
開放的	210
解を持つ	25
カウフマン	193
カオス	194
可解判定	25
書き換え規則	216

拡散 200, 215
 拡散サイト 215, 216
 学習 105, 111, 124
 学習アルゴリズム 138, 148, 152
 学習期 147
 学習機械 113
 学習係数 140, 148
 学習データ 115
 学習率 115, 118
 拡張性 7
 獲得形質 2
 確率行列 166
 確率プロセス 168
 隠れ層 138, 147, 151, 152
 下限 102
 可視層 147, 149
 カスケードモデル 176
 画像圧縮 149
 画像処理 152
 画像理解 92
 活性化 193, 195, 215, 219, 221, 223, 231
 活動電位 112
 壁に沿う行動計画 10
 可約な式 44
 環境 15
 環境認識 14
 感謝祭 187
 感情解析ツール 185
 関節 27
 関節角 203
 完全情報ゲーム 97
 完全性 38, 57
 単純化 45
 完備化手続き 21
 簡約化 19
 簡約化系列 20
 簡約化された Gröbner 基底 24
 関連性 171, 183
 関連性評価 161, 163
 緩和振動子 228

【き】

木 73, 180
 — の深さ 77
 記憶パターン 130
 機械学習 17, 197
 幾何学的意味論 47
 幾何学的実体 50
 幾何学的推論 16, 43
 幾何学的定理証明 30
 幾何学的変数 28
 記号表現 56
 記号論理 12, 46, 47, 49
 擬除算 40, 43
 奇数パリティ 140
 軌跡問題 56
 偽造 170
 基底 17
 基本作図コマンド 61
 逆機構学 27
 既約代数多様体 54
 既約多項式 46
 逆問題 195
 キャッシュ 162
 境界線 93
 強化学習 160, 163
 競合学習 10
 教師あり学習 172
 協調行動 10
 協調動作 203
 行列 53, 55
 極小値 132
 極小点 129, 143, 144
 局所解 145, 197, 213
 局所的相互作用 202
 極性 216
 キーワード 163, 170
 キーワードリスト 161
 近傍グラフ 156
 金融危機 185
 金融工学 185
 金融テキストマイニング 185

【く】

偶パリティ問題 120
 クエリ 153, 156, 171, 173, 177
 屈伸 204
 グラフ 72, 220
 繰り返し構造 214
 グールド 2
 グレブナー 18
 クロスエントロピー 174
 グローバルな情報 165, 202
 訓練例 149, 151, 171, 174, 179, 181

【け】

計画的細胞死 211
 計画的自殺 211
 計算幾何学 16
 計算量 40, 152
 形状関数 199
 形態 214
 系統発生 2, 192
 経路 36, 73
 経路計画モジュール 8
 経路作成 15
 下界 85
 結合荷重 216
 結合係数 129, 138
 決定可能 17
 決定木 176
 ゲノム 189, 214, 216
 原核生物 190
 検索エンジン 170
 検索語 153, 161, 162
 検索ロス 164
 原始モンテカルロ 107
 検証例 181
 減衰温度 149
 限定子 31

【こ】

弧 72
 子 73, 154, 165
 効果器 27

<p>項書換システム 21</p> <p>交 叉 212, 226</p> <p>交 差 51</p> <p>交差検定 181</p> <p>交叉点 225</p> <p>交叉率 180</p> <p>更新規則 118</p> <p>構成主義 2, 14</p> <p>合成生物学 218</p> <p>構成物 210</p> <p>酵 素 191, 220</p> <p>構 造 221</p> <p>構造解析 211</p> <p>構造領域 195</p> <p>後続点 73</p> <p>恒等式 54, 57, 58</p> <p>恒等条件 17</p> <p>行動に基づくロボティクス 14</p> <p>好熱性酵素 220</p> <p>興奮性 127</p> <p>酵 母 198</p> <p>合理主義 3</p> <p>コザ 10</p> <p>コサインロス 174</p> <p>コーシー・シュワルツの 不等式 119</p> <p>個体発生 2, 192</p> <p>古典的 AI 14</p> <p>コネクショニズム 1, 124</p> <p>固有値 165</p> <p>固有ベクトル 157, 165</p> <p>コンパス 60</p>	<p>最大固有値 157</p> <p>最短経路 77, 81, 85</p> <p>最適化 206</p> <p>最適解 108</p> <p>細 胞 191, 194, 195, 199</p> <p>細胞体 112</p> <p>サイモン 1</p> <p>最良個体 213</p> <p>逆立ち 206</p> <p>作図問題 60</p> <p>サーチエンジン 153, 176</p> <p>座標幾何 31</p> <p>差分進化 181, 204</p> <p>サポートベクタ 179</p> <p>三角化 29, 39, 40</p> <p>—のアルゴリズム 39</p> <p>三角関数 54</p> <p>三角形式 37, 42, 54, 57</p> <p>三角振動子 228</p> <p>三段論法 11</p> <p>サンプリング 152</p>	<p>実数値関数 172</p> <p>実数値代数 32</p> <p>実代数多様体 31</p> <p>質量作用動力学 220</p> <p>自動制御 199</p> <p>シナプス 112, 193, 215, 216</p> <p>シミュレーション 10</p> <p>写像問題 30</p> <p>集合知 15</p> <p>収 束 114, 143, 144, 155</p> <p>収束定理 117</p> <p>従属変数 37, 40, 54</p> <p>柔軟性 207</p> <p>十分性 56</p> <p>終了温度 149</p> <p>述語論理 46</p> <p>出次数 154, 165</p> <p>出発点ノード 222</p> <p>出力層 113, 138, 148</p> <p>出リンク 154</p> <p>主ベクトル 168</p> <p>順 位 165</p> <p>ジョイント変数 28</p> <p>定 規 60</p> <p>消去手続き 26</p> <p>上 限 102</p> <p>ショウジョウバエ 216</p> <p>状態空間 70</p> <p>状態遷移 143, 144</p> <p>状態変数 201</p> <p>衝突回避 8, 199</p> <p>小 脳 113</p> <p>常微分方程式 194, 203</p> <p>情報検索 164, 177</p> <p>情報抽出 171</p> <p>情報量基準 147</p> <p>道 遥 5, 8</p> <p>剰余環 27</p> <p>剰余項 38, 46, 47, 54, 57, 66</p> <p>勝 率 106</p> <p>初期温度 149</p> <p>初期状態 71, 86, 141, 201</p> <p>初期世代 214</p> <p>初期濃度 222</p>
【し】		
<p style="text-align: center;">【さ】</p> <p>再帰の手続き 92</p> <p>再帰的な構造 154</p> <p>最急降下法 139, 147, 174</p> <p>最高順位項 19</p> <p>最終状態 201</p> <p>最小エネルギー 144</p> <p>最小公倍数 19</p> <p>最小値 143, 147</p> <p>最大公約数 19</p> <p>最大公約多項式 27</p>	<p>自 我 2</p> <p>シグナル遺伝子配列 219</p> <p>シグナル配列 222, 225</p> <p>シグモイド関数 125, 139, 142, 200, 202</p> <p>自己活性化 222</p> <p>自己活性ノード 225</p> <p>自己修復 209</p> <p>自己組織化ファジーニューラル ネットワーク 185</p> <p>自己符号化器 151</p> <p>辞書式順序 18</p> <p>指数関数的 81, 195</p> <p>シスエレメント 211</p> <p>システム生物学 218</p> <p>事前学習法 151</p> <p>自然言語解析 185</p> <p>実現確率 144</p> <p>実時間コントローラ 199</p> <p>実数体 38, 45</p> <p>実数値重みベクトル 161</p>	<p>実数値関数 172</p> <p>実数値代数 32</p> <p>実代数多様体 31</p> <p>質量作用動力学 220</p> <p>自動制御 199</p> <p>シナプス 112, 193, 215, 216</p> <p>シミュレーション 10</p> <p>写像問題 30</p> <p>集合知 15</p> <p>収 束 114, 143, 144, 155</p> <p>収束定理 117</p> <p>従属変数 37, 40, 54</p> <p>柔軟性 207</p> <p>十分性 56</p> <p>終了温度 149</p> <p>述語論理 46</p> <p>出次数 154, 165</p> <p>出発点ノード 222</p> <p>出力層 113, 138, 148</p> <p>出リンク 154</p> <p>主ベクトル 168</p> <p>順 位 165</p> <p>ジョイント変数 28</p> <p>定 規 60</p> <p>消去手続き 26</p> <p>上 限 102</p> <p>ショウジョウバエ 216</p> <p>状態空間 70</p> <p>状態遷移 143, 144</p> <p>状態変数 201</p> <p>衝突回避 8, 199</p> <p>小 脳 113</p> <p>常微分方程式 194, 203</p> <p>情報検索 164, 177</p> <p>情報抽出 171</p> <p>情報量基準 147</p> <p>道 遥 5, 8</p> <p>剰余環 27</p> <p>剰余項 38, 46, 47, 54, 57, 66</p> <p>勝 率 106</p> <p>初期温度 149</p> <p>初期状態 71, 86, 141, 201</p> <p>初期世代 214</p> <p>初期濃度 222</p>

- | | | | | | |
|---------------|--|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 触媒 | 192 | 正規化アルゴリズム | 21 | 選択方式 | 212 |
| 自律移動ロボット | 3 | 正規化係数 | 156 | | |
| 進化可能性 | 193, 207 | 正規型 | 20 | 【そ】 | |
| 真核生物 | 190 | 正規化割引累積ゲイン | 175 | 双安定ネットワーク | 225 |
| 進化計算 | 12, 163, 176,
197, 198, 204, 211,
214, 217, 219, 221 | 正規形式 | 20 | 相関 | 198 |
| 進化心理学 | 2 | 制御層 | 8 | 相互結合 | 126 |
| 進化発生生物学 | 192 | 正弦波 | 227 | 相互結合係数 | 127 |
| シンクノード | 156, 166 | 精神分析学 | 2 | 相互作用 | 14, 221 |
| 神経回路網 | 111 | 生成速度 | 203 | 相互情報量 | 198 |
| 神経細胞 | 112 | 製造コスト | 211 | 創発 | 193, 199, 203 |
| 人工進化 | 217 | 成長 | 193 | 創発学習 | 10 |
| 人工頭脳プロジェクト | 16 | 精度 | 174 | 双方向 | 73 |
| 人工生命 | 219 | 正方形の形状への配置 | 201 | 促進 | 203 |
| 人工的個体発生 | 214 | 生命システム | 218 | 素子数 | 148 |
| 人工ニューラルネットワーク | 221 | 制約充足 | 92 | ソナー人間 | 218 |
| | 227 | 正例 | 113, 116 | ソナーモジュール | 8 |
| 信号配列 | 227 | 積層自己符号器 | 152 | 損失関数 | 174, 176 |
| 深層学習 | 15, 124, 151 | 世代 | 213 | | |
| 身体性知能 | 14 | 設計問題 | 197 | 【た】 | |
| 身体性認知科学 | 14 | 接触 | 51 | 大域的な情報 | 200 |
| 伸張 | 219 | 絶対誤差の平均値 | 188 | 退化条件 | 45 |
| 振動回路 | 221 | 切断酵素 | 220 | 対称性 | 49, 134, 203 |
| 振動性 | 225 | 節点 | 72 | 代数学的手法 | 16 |
| 信頼性 | 107, 219 | 摂動問題 | 30 | 代数学的証明 | 46 |
| 心理学 | 111 | セマンティクス | 48, 49, 55 | 代数幾何学 | 37 |
| | | セル | 199 | 代数生物学 | 18 |
| 【す】 | | セルラーエンコーディング | 216 | 代数多様体 | 17, 36, 44, 47 |
| 垂直 | 52 | ゼロベクトル | 118 | 代数的拡大体 | 25 |
| スイッチ振動子 | 227 | 遷移確率 | 166 | 代数的作図コマンド | 63, 66 |
| 推論 | 11 | 遷移行列 | 166 | 代数的推論 | 49 |
| 推論規則 | 64 | 遷移グラフ | 168 | 大腸菌 | 198 |
| スケジュール | 147 | 線画 | 16 | 大統領選挙 | 187 |
| スケラビリティ | 210 | —の解釈 | 93 | ダイナミクス | 199, 220 |
| ステップ関数 | 125, 139 | 線形結合 | 172 | ダウ平均株価 | 185, 187 |
| スパムページ | 170 | 線形同次方程式 | 27 | 楕円問題 | 32 |
| スピアマンの順位相関係数 | 198 | 線形分離可能 | 114, 118, 120 | 多細胞生物 | 211 |
| | | 選好制約 | 173 | 多重ゴール | 6 |
| 【せ】 | | 先行点 | 73 | 多重センサ | 6 |
| 生化学システム | 219,
220, 225, 231 | センサ | 202 | 多重ロボットシステム | 199 |
| 生化学ネットワーク | 222 | 全次順序 | 18 | 多数決原理 | 198 |
| 正規化 | 155, 162, 165, 167, 186 | 全順序 | 18, 174 | 多層ニューラルネットワーク | |
| | | 染色体 | 192 | | 124 |
| | | センシング | 4 | タッチセンサ | 215 |
| | | 選択圧 | 192 | 縦型探索 | 76 |

多点探索 197
 ダミー変数 115
 多面発現性 214
 多様性 192, 194
 タルスキ 17
 たわみ 211
 探 索 5, 111
 探索空間 91, 195
 探索戦略 161
 タンパク質 189, 195, 199, 201

【ち】

チェス 70, 101
 チェッカー 100
 知識がある 88
 知識工学 1
 地図作成 7, 15
 チックタクトー 98
 秩 序 194
 知能の誕生 2
 中間層 138, 149, 151
 中間複合物 227
 中 点 53
 中立的な突然変異 213
 超球面 50
 長期抑圧 113
 調 節 211
 調節遺伝子 215
 調節制御 191
 調節タンパク質 192
 調節領域 195
 超楕円 27
 頂 点 73
 調和級数 147
 直 感 2
 直 交 60, 151
 チョムスキー 3

【つ】

通 信 149

【て】

停止性 40
 定常分布 168

定理証明 17, 35, 37
 定量的数理モデル 220
 データマイニング 185
 適応学習 10
 適合度 211, 213, 225, 227
 テキストマイニング 185
 テスト例 181
 展 開 74, 80, 83, 88, 98
 展開数 77
 電気信号 112
 転 写 190, 194, 198, 216
 転写レート 203
 伝達効率 127
 伝 搬 126
 テンプレート遺伝子 222
 テンプレートスイッチ 223, 229
 テンプレート濃度 222
 テンプレート無効化 223

【と】

同一直線上 52
 統合モジュール 8
 動作規則 127, 143, 145
 導出原理 46
 到着点ノード 222
 頭尾極性 216
 動力学定数 221
 動力学パラメータ 222
 ドキュメント 171, 177
 ドキュメントサイズ 162, 180
 特性定理 21
 特徴ベクトル 172, 177
 独立性 49
 独立変数 37, 42, 47, 48, 54, 57, 58
 突然変異 161, 163, 192-194, 213, 214, 222, 226
 突然変異率 180, 212
 凸の稜 93
 トポロジー 210, 216, 221, 225, 228, 229
 ドメイン 219
 トランスクリプトーム 195
 ドレイファス 3

トレーニングコーパス 171
 ド・モアブル 70

【な】

ナイトツアー 70, 80, 88, 133
 内部表現 151

【に】

ニューウェル 1
 入次数 154
 入力層 113, 126, 138, 148, 152
 入力パターン 149, 151
 入力ベクトル 114
 入リンク 154, 183
 ニューラル制御 214
 ニューラルネットワーク 1, 10, 12, 124, 161, 163, 173, 192, 214, 216
 ニューロン 112, 124, 147
 認知科学 1, 3
 認知心理学 11

【ね】

根 73
 ネガティブフィードバック ループ 227
 ネットワーク 167
 —の温度 142
 ネットワーク推定 197
 熱力学的安定性 221

【の】

ノイズ 132, 195, 203, 214
 脳 111
 脳科学 2
 濃 度 221
 濃度勾配 215
 ノード 72, 220
 ノード生成数 104

【は】

胚 192
 バイアス 143
 バイアス値 125

バイオレメディエーション 218
 ハイパーリンク 153
 胚発生 210
 背腹極性 216
 箱押し 10, 217
 パーセプトロン 113, 172
 パターン 129
 パターンインデックス 115
 パターン形成 203
 パターン認識 129
 パターンベクトル 118
 パターンマッチング 55
 発火 112, 127
 バックトラック 55, 76,
 80, 92, 96
 バックプロパゲーション 124,
 138, 163
 発現 193
 発現パターン 214, 217
 発現量 197
 発現レベル 191
 発生 191, 217
 罰則 163
 発達 191, 193, 198, 209
 ハーディ 147
 ハブ 153, 170
 パラメータ突然変異 223
 パリティ 120, 140
 反学習期 147
 繁殖 161
 反復深化法 80
 反復説 2
 判別関数 124
 反 AI 3
 【ひ】
 ピアジェ 2
 ピアソン相関係数 198
 ピアノ・ムーバ問題 36
 引き分け 100
 必要性 56
 非同期的 126
 微分方程式 207
 ヒューマノイドロボット 203

ヒューリスティクス 1, 17,
 45, 46, 60, 85, 88, 178, 183
 評価関数 87, 98,
 104, 105, 158, 164
 評価基準 174, 177
 評価値 101, 158, 163, 164
 表現型 192, 193,
 210, 213, 214, 216
 表現主義 3
 標準形 27
 広さ優先探索 80
 ピンカー 2
 ヒントン 142

【ふ】

フィードバック 4, 126, 161,
 164, 192, 201, 229
 フィードフォワード 227
 深さ 82, 85
 —の限界 80
 深さ優先探索 73
 複雑系 10, 158
 複雑性 210
 符号化 151
 ブースティング 176, 180
 ブッホバナー 21
 不等式 49, 55
 ブートストラップ法 198
 部分構造 225, 227
 部分順序 174
 部分多様体 47, 57
 部分補体 219
 普遍文法 3
 プライテンベルクピークル 14
 フランス国旗の発達 209
 プランニング 4
 プール関数 193, 194
 プルキンエ細胞間 113
 プルクス 3, 14
 負例 113, 116
 プレイアウト 106
 フロイト 2
 プログラム細胞死 211
 プロモータ 190, 214

分解速度 203
 分散自己適合型 199
 分散制御システム 201
 分子機械 191
 分子機構 197
 分子ネットワーク 219
 分子プロセス 220
 分離平面 116, 118

【へ】

ペアワイズ 173
 平穏指数 188
 平均照度 211
 平均精度 175, 180
 平均2乗誤差 225
 平行 52
 平行関係 43
 平衡状態 144, 148, 194, 201
 平行繊維 113
 ペイジ 165
 ペイジアンネットワーク 198
 閉路 72
 ベクトル 53, 55
 ベータ値 102
 ヘッケル 2
 辺 220
 ベンチマーク問題 197
 偏微分方程式 30

【ほ】

ポイントワイズ 172
 方形振動子 227
 方向ベクトル 50, 58
 報酬 163
 包摂アーキテクチャ 3, 14
 飽和レベル 203
 歩行 206
 補助条件 42, 45
 補助線 17, 47
 母性効果遺伝 215
 ホップフィールド型
 ネットワーク 126, 143
 ボディプラン 192
 ポリメラーゼ 190, 219

ボルツマン分布 144
 ボルツマンマシン 142
 翻訳 190

【ま】

マ ー 113
 前向き推論 46
 マージン 118
 マスター制御遺伝子 192
 マッカーシー 1
 マルコフ連鎖 166
 マルバツ 98, 104

【み】

未受精卵 216
 ミンスキー 1, 124

【む】

無意識 2

【め】

迷惑問題 170
 面積 53, 55

【も】

目的関数 145, 200
 目標状態 71
 目標節点 86, 88
 モジュラー性 192, 210, 214
 モジュール 8
 モータニューロン 215
 モチーフ 229
 モデル構築 197
 モンテカルロ木探索 106

【や】

焼きなまし法 145, 149, 198

【ゆ】

有限オートマトン 10
 有限直径 120
 有限要素法 211

有 向 73
 — のグラフ 154
 尤 度 174
 誘導タンパク質 192
 有用性 163
 有理数体 30, 38
 ユークリッド距離 53, 119
 ユークリッド空間 16, 33, 49
 ユーザリクエスト 164
 ユニット 214, 216
 夢 147

【よ】

抑 制 127, 203, 219, 223
 抑制配列 222
 余弦損失 174
 横型探索 81
 予測値 176
 予測モデル 174
 読 み 100
 余 裕 118

【ら】

ラマルク説 2
 ラメルハート 138
 ランキング 198
 ランキング学習 171, 173, 176, 177, 180
 ランキング関数 171, 183
 ランキングスコア 172, 179
 ランク 165
 ランク逆数 175
 ランク値 180
 ランダムウォーク 166, 168
 ランダム木探索法 198
 ランダムプーリアングラフ 193

【り】

力学系 194
 離散確率変数 166
 リストワイズ 174
 リバースエンジニアリング 196

リプレッサ 191
 利便性 171
 リボソーム 190
 リーマンショック 185
 リミットサイクル 225
 粒子群最適化 180
 履歴マーキング 222
 臨界状態 194
 リンク 153, 221
 リンク農場 170
 リンクファーム 156, 170
 隣接行列 155, 166

【る】

ルジャントル 70
 ループ 73

【れ】

レイアード 11
 零 点 17, 33
 劣 化 220
 連結グラフ 72
 連結性 120
 連結部分グラフ 170
 連想記憶 129, 130
 連立常微分方程式系 221

【ろ】

ローカル情報 165, 201
 ローゼンブラット 113
 ロバスト性 6, 132, 178, 193, 194, 197, 207, 229
 ロボット 16, 27, 56, 199
 ロボットシミュレータ 204
 論理積 115
 論理的推論 11

【わ】

ワイゼンバウム 3
 割り算の回数 40

[A]		[E]	Kullback-Leibler の ダイバージェンス 147
A* アルゴリズム 85		ERNe 219, 222	[L]
AdaBoost 173, 179		ERR 176	L 型 94
AGN 203, 207		Eval 53	LETOR 172, 177, 181
AMRT 180		Evo-Devo アプローチ 192, 209	LISP 10, 49, 53
AND 115		extension 34	LMIR 178
AND ノード 98, 100		[F]	LTD 113
AND/OR 木 97		fault-tolerant 4	[M]
AP 175		FORK 型 94	MAP 174, 175, 179, 182
ARROW 型 94		[G]	MAPE 値 188
AVI アルゴリズム 17		GA 10, 197	MAX ノード 98, 100, 102
α - β カット 101		GBDT 176	McCulloch-Pitts ニューロン 112
[B]		Google 153, 165	META タブ 170
B* アルゴリズム 85		GP 10, 180, 197	MIN ノード 98, 100, 102
base 33		GPOMS 185, 187	MIN/MAX 木 97
BL 10		GPRank 180	mRNA 195, 203
BM25 178		GRN 191, 194	MRR 175
[C]		[H]	[N]
cad 33		HITS 156, 178, 183	NDCG 174, 175, 180, 182
CCA 180		HOAP-2 203	NEAT 221
cell 33		HostRank 178, 183	[O]
Church-Rosser 性 21		Hox 遺伝子 192, 217	Okapi 179
CNC 211		HTML コード 170	Oligator 220, 222, 227, 229
Crazy Stone 106		[I]	OpinionFinder 185
cross-validation 181		ID 番号 222	OR ノード 98, 100
[D]		idf 178, 183	[P]
DE 181		InfoSpiders 158	PageRank 165, 178
DJIA 185, 187		in silico 221	PCD 211
dl 178		in vitro 219	PDP 124
DNA 189		IR 171	POLE 180
DNA 結合モチーフ 229		[J]	POMS 186
DNA 結合領域 219		JPEG 209	projection 33
DNA ツールボックス 219		[K]	PSO 180
DNA テンプレート 220		Kleinberg のアルゴリズム 155	$P@n$ 174
DNA マイクロアレイ 195		Knuth-Bendix の手法 21	
DREAM 197			

	[Q]		[T]			[X]	
QE		31	SwamRank	180		XOR	120
	[R]		T 型	94		[Y]	
RankBoost		173, 179, 182	t 検定	182		Yahoo!	171, 176
RankDE		180, 182	TAB	3		[Z]	
RankPOLE		180	tf	178, 179		z 値	186, 198
RankPOLE-BP		180	tfidf	178		~~~~~	
RankSVM		179	TREC	177		[数字]	
RBG		193	Twitter	185		1 点交叉	225
RBM		152	[U]			2 次形式	128
RNA		190	UCB	109		2 次元グラフィックス	209
	[S]		UCT アルゴリズム	110		2 次元図形	200
S 式		49	[V]			2 次元平均ノルム	168
S 多項式		21	VCA	17		2 重らせん	190
Simson の定理		30	[W]			2 値分類可能	114
simulated annealing		145	Wu の定理	37		2 点交叉	163, 225
SNS		15	Wu の手続き	38		3 等分線	61
SOFNN		185, 188	WWW	15, 153		3 目並べ	98
SSA		3, 14				9 点円定理	41
SVM		173					

—— 著者略歴 ——

1990年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（情報工学専攻）
工学博士
1990年 電子技術総合研究所入所
1998年 東京大学助教授
2004年 東京大学教授
現在に至る

人工知能の方法 ——ゲームから **WWW** まで——

Artificial Intelligence Methodologies

© Hitoshi Iba 2014

2014年9月8日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 伊庭 志
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

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 978-4-339-02483-8 (新井) (製本：愛千製本所) G

Printed in Japan



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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします