

前書き

人工知能 (Artificial Intelligence: AI) は、広大な領域であり、そのため本書も大冊である。我々は、この領域のすみずみにわたって探求することを心掛けた。それは、論理、確率、連続数学、認知、推論、学習、および行為にまで、さらには、電子デバイスからロボットによる惑星探査にまで及んでいる。本書が大冊であるもう一つの理由は、各章の主要部分の中心的部分に限ってではあるが、重要な結果を示すためにある程度深い考察までも行っていることである。各章の終わりの“文献と歴史ノート”では、さらなる結果へのポイントを与えた。

本書の副題は、“モダンアプローチ”である。この一見無意味な言葉が意味するところは、人工知能の各部分領域をそれらの独自の歴史的な脈に沿って解説するのではなく、現在知られている事柄を共通の枠組みの中で再構築することを試みた、ということである。結果として、各部分領域についての理解は、多少困難になったかもしれない点をご容赦願いたい。

本書の主要な統一テーマは、知的エージェント の概念である。我々は人工知能を、環境から知覚し、行為を行うエージェントの究明と定義する。そのような個々のエージェントは知覚を行為に変換する関数によって記述される。本書では、これらの関数を表現する多くの異なった方法を取り上げる。それらは、プロダクションシステム、条件反射エージェント、実時間条件付きプランナ、ニューラルネットワーク、および意思決定理論的システムである。我々は、学習の役割をエージェント設計者の設計範囲を未知の環境にまで広げるものと捉え、それがエージェントの設計に影響を及ぼし、明示的な知識の表現と推論を選択するようになることを示す。我々は、ロボティクスおよび視覚の研究を独立した研究とみなさずに、知的エージェントが目標を達成するために必要な要素技術と考える。我々は、適切なエージェントの設計におけるタスクの実行環境特性の重要性を強調する。

本書の主要な目的は、過去 50 年以上の人工知能研究から生まれたアイデア、およびそれに関連する過去 2000 年の成果を読者に伝えることである。これらのアイデアを表現するのに、厳密性を保ちつつも、過度な形式化に走らないように心掛けた。必要に応じて、我々はそれらのアイデアを明確にするために、擬似コードによるアルゴリズムを載せた。擬似コード自身の説明は、付録 B にある。それらのアルゴリズムのいくつかのプログラミング言語による実装は、本書のウェブサイト、aima.cs.berkeley.edu に掲載されている。

本書は、主として大学の学部の授業、あるいは一連の授業で使われることを目的としている。しかしながら、本書を（参考文献の項で参照したいいくつかの一次資料を追加するなどして）大学院レベルのテキストとして使ってもよい。本書は広い範囲を覆っており、多くの詳細アルゴリズムを含んでいるので、人工知能専攻の学生や、専門分野からさらに他の分野に視野を広げたいと考えている専門家が最初に調べる資料として有用である。本書を読むに当たってのただ一つの前条件は、大学 2 年レベルの計算機科学の基本概念（アルゴリズム、データ構造、計算量など）に対する知識だけである。大学 1 年レベルの微積分は、ニューラルネットワークおよび統計的学習理論を詳しく理解するのに役立つであろう。前条件となる数学の一部は、付録 A で取り上げた。

本書の構成

本書は 8 部から成り立っている。I 部 人工知能は、AI 全体を知的エージェント——何をすればよいかを決定し、それを行うシステム——の考えに基づいて眺める見方を提供する。II 部 問題解決は、たとえば大陸を横断する際の道案内や、チェスの対戦時のように、数ステップ先について前もって考えておく必要のあるとき、何をなすべきかを決定するための方法について、集中的に考察する。III 部 知識と推論では、世界についての知識——それがどのようなにはたらくのか、現在はどのような状態なのか、ある人の行為が何をもたらすのか、など——を表現する方法、およびその知識を用いて論理的に推論する方法について論じる。IV 部 プランニングでは、何をなすべきかを決定する際にこれらの推論方法をいかに用いればよいかを、特に プラン を立てる場合について述べる。V 部 不確実な知識と推論は、III 部と IV 部に似ているが、そこではたとえば医療診断や治療のためのシステムが直面する、世界に関する 不確実性 の存在下での推論と意思決定問題に集中する。

II 部から V 部までが、知的エージェントの構成要素の中で決定を下す責任を担っている部分について記述している。VI 部 学習はこれらの意思決定部で必要としている知識を生成する方法について論じている。VII 部 対話、知覚、行為では、知的エージェントがまわりで何が起きているかを感知するために、視覚、触覚、聴覚、あるいは言語理解によって環境を知覚する方法、および、ロボットの動作が自然言語の発話のどちらかの手段によってプランを実際の行為に変える方法について論じる。最後に、VIII 部 結論で、人工知能の過去と未来、および哲学的、倫理的意味について論じる。

第 1 版からの変更点

1995 年の第 1 版の出版以来、AI 分野は大きく変化し、その結果として本書も大改訂を行った。最新の成果を反映させ、従来の成果を新たな知見と整合的に解釈するために、さらにはアイデアの教育的な見地に立った伝達方法を改善するために、各章とも大幅な書換えを行った。1995 年当時に比べて、AI の果実は比較にならないほど実用技術として成熟してきたことを知らしめたい。たとえば、第 1 版でのプランニングアルゴリズムはたかだか数十ステップのプランしか生成できなかったが、本版でのアルゴリズムは数万ステップへと桁違いの性能を示している。同様の桁単位の改善は、確率推論、自然言語処理、などの分野でもみられる。以下に、本版での特筆すべき変更点を挙げる：

- I 部では、制御理論、ゲーム理論、経済学および脳科学における従来の成果の紹介が追加された。これによって、引き続き章でのこれらの考え方を取り入れたより統一的な記述が可能となる。
- II 部では、実時間探索アルゴリズムが追加された。また、制約充足に関する新たな章が付け加えられた。後者は、論理学への自然なつながりの役割を果たす。
- III 部では、命題論理の扱いが第 1 版と異なる。第 1 版ではそれは一階述語論理への導入として位置づけられたが、本版ではそれ自身で高速な推論アルゴリズムを備え、回路に基づくエージェントの設計のための、有用な表現言語として提示した。一階述語論理の章は、その内容をより明確に記述するために再構成し、インターネットショッピングの例を加えた。
- IV 部では、GRAPHPLAN や充足に基づくプランニングなどの新たなプランニング法を追加した。また、スケジューリング、条件付きプランニング、階層的プランニング

およびマルチエージェントプランニングについての記述の充実を図った。

- V 部では、ベイジアンネットに関して、変数消去、マルコフ連鎖モンテカルロなどの新しいアルゴリズムを追加した。さらに、不確実時相推論の章を追加し、隠れマルコフモデル、カルマンフィルタおよび動的ベイジアンネットを取り上げた。マルコフ意思決定過程についての記述はさらに深めた。また、ゲームの理論およびゲームの機構設計の節を新たに設けた。
- VI 部では、統計的学習、記号的学習およびニューラルネットワークを関連づけて説明し、さらに、ブースティングアルゴリズム、EM アルゴリズム、インスタンススペース学習およびカーネル法（サポートベクターマシン）の節を付け加えた。
- VII 部では、言語処理関連で談話処理と文法推論の節を新たに加えた。さらに、確率的言語モデルの章を新たに起こし、情報検索および機械翻訳への応用も取り上げた。ロボティクスに関しては、不確実なセンサデータの統合に焦点を当てた。知覚の章では、物体認識の記述を更新した。
- VIII 部では、人工知能の倫理的な意味についての節を導入した。

本書の使い方

本書は 27 章から成っており、各章はほぼ 1 週間分の講義を必要とするので、すべての章を消化するには 2 セメスターを必要とする。あるいは、教師と学生の興味に応じて適当な章を選択してコースをデザインすることは容易である。本書は広い範囲をカバーしているので、短い導入的な学部生向けコースから、先端的なトピックスから成る大学院向けコースまで、多様なコースに利用できる。600 を超える大学や単科大学での本書の第 1 版を採用した際のシラバスは、本書のウェブサイト aima.cs.berkeley.edu に示されている。そこには、必要に応じてどのように章を選択すればよいのかを助言してくれる有用な情報も掲載されている。

本書には全部で 385 の練習問題が含まれている。かなりな分量のプログラミングを必要とする問題はキーボードのアイコンを付けた。これらの練習問題を解く最善の方法は aima.cs.berkeley.edu に用意されているコード貯蔵庫を調べることである。それらの内のいくつかは学期プロジェクトとして考えてよいほど、大きい問題である。多くの練習問題は、文献調査を必要とする。それらの問題には、本のアイコンを付けた。

本書は、重要な部分を指さしアイコンによって示している。本書では、事項の検索を容易にするために、約 10,000 に及ぶ項目の索引を付けた。新しい用語 が定義されるたびに、それは余白にも表示される。

ウェブサイトの使い方

ウェブサイト aima.cs.berkeley.edu には、以下の情報が含まれている：

- 本書中に現れるアルゴリズムのいくつかの言語による実装
- 本書を利用した 600 を超える学校のリストとそれらの内の大部分でのオンライン教材へのリンク
- 有用な AI に関する情報をもった 800 以上のウェブサイトへのリンクの注釈つきリスト



新しい用語



- 章ごとの補助教材とリンクのリスト
- 本書の討論グループへの参加方法
- 著者へ質問やコメントをするための連絡方法
- 本書の誤りを報告する方法
- 教材として利用するための本書中の図のコピー，スライドなど

謝辞

Jirendra Malik は，24 章（知覚）の大部分を執筆した．25 章（ロボティクス）は，本版では Sebastian Thrun が，第 1 版では John Canny がその大部分を書いた．第 1 版では，Doug Edwards がすべての章での歴史について調べた．Tim Huang, Mark Paskin および Cynthia Bruyns は，図およびアルゴリズムの書式を整える手助けをしてくれた．Prentice-Hall 社の Alan Apt, Sondra Chavez, Toni Holm, Jake Warde, Irwin Zucker および Camille Trentacoste は我々の執筆がスケジュールどおりに進行するために最善をつくし，本書のデザインと内容についての多くの有益な助言を与えてくれた．

Stuart は両親に常に変わらぬ支援と励ましに対して感謝する．Stuart はクリスマスには家に帰れることを期待している．Stuart はまた，妻の Loy Sheflott に，彼女の無限の忍耐と限りない分別に対して感謝したい．彼は，Gordon と Lucy がじきに本書を読んでくれることを望む．RUGS (Russel's Unusual Group of Students) は，めったにないほど手助けしてくれた．

Peter は両親（Torsten および Gerda）にこの仕事を始めるきっかけを与えてくれたことに，また，妻（Kris）と子供たち，友人たちに長時間にわたる執筆および長時間にわたる書き直しの間中励まし，かつ辛抱してくれたことに対して感謝する．

我々は，パークレー，スタンフォード，MIT および NASA の図書館司書，我々の研究の方法論に対して革命を起こした CiteSeer と Google の開発者たちに多くを負っている．

我々は本書を使い，助言を頂いた方すべてに対して個々に謝辞を述べることはできないが，以下の人たちによる貴重なコメントに対しては特に感謝の意を表したい： Eyal Amir, Krzysztof Apt, Ellery Aziel, Jeff Van Baalen, Brian Baker, Don Barker, Tony Barrett, James Newton Bass, Don Beal, Howard Beck, Wolfgang Bibel, John Binder, Larry Bookman, David R. Boxall, Gerhard Brewka, Selmer Bringsjord, Carla Brodley, Chris Brown, Wilhelm Burger, Lauren Burka, Joao Cachopo, Murray Campbell, Norman Carver, Emmanuel Castro, Anil Chakravarthy, Dan Chisarick, Roberto Cipolla, David Cohen, James Coleman, Julie Ann Comparini, Gary Cottrell, Ernest Davis, Rina Dechter, Tom Dietterich, Chuck Dyer, Barbara Engelhardt, Doug Edwards, Kutluhan Erol, Oren Etzioni, Hana Filip, Douglas Fisher, Jeffrey Forbes, Ken Ford, John Fosler, Alex Franz, Bob Futrelle, Marek Galecki, Stefan Gerberding, Stuart Gill, Sabine Glesner, Seth Golub, Gosta Grahne, Russ Greiner, Eric Grimson, Barbara Grosz, Larry Hall, Steve Hanks, Othar Hansson, Ernst Heinz, Jim Hendler, Christoph Herrmann, Vasant Honavar, Tim Huang, Seth Hutchinson, Joost Jacob, Magnus Johansson, Dan Jurafsky, Leslie Kaelbling, Keiji Kanazawa, Surekha Kasibhatla, Simon Kasif, Henry Kautz, Gernot Kerschbaumer, Richard Kirby, Kevin Knight, Sven Koenig, Daphne Koller, Rich Korf, James Kurien, John Lafferty, Gus Larsson, John Lazzaro, Jon LeBlanc, Jason

Leatherman, Frank Lee, Edward Lim, Pierre Louveaux, Don Loveland, Sridhar Mahadevan, Jim Martin, Andy Mayer, David McGrane, Jay Mendelsohn, Brian Milch, Steve Minton, Vibhu Mittal, Leora Morgenstern, Stephen Muggleton, Kevin Murphy, Ron Musick, Sung Myaeng, Lee Naish, Pandu Nayak, Bernhard Nebel, Stuart Nelson, Xuan-Long Nguyen, Illah Nourbakhsh, Steve Omohundro, David Page, David Palmer, David Parkes, Ron Parr, Mark Paskin, Tony Passera, Michael Pazzani, Wim Pijls, Ira Pohl, Martha Pollack, David Poole, Bruce Porter, Malcolm Pradhan, Bill Pringle, Lorraine Prior, Greg Provan, William Rapaport, Philip Resnik, Francesca Rossi, Jonathan Schaeffer, Richard Scherl, Lars Schuster, Soheil Shams, Stuart Shapiro, Jude Shavlik, Satinder Singh, Daniel Sleator, David Smith, Bryan So, Robert Sproull, Lynn Stein, Larry Stephens, Andreas Stolcke, Paul Stradling, Devika Subramanian, Rich Sutton, Jonathan Tash, Austin Tate, Michael Thielscher, William Thompson, Sebastian Thrun, Eric Tiedemann, Mark Torrance, Randall Upham, Paul Utgoff, Peter van Beek, Hal Varian, Sunil Vemuri, Jim Waldo, Bonnie Webber, Dan Weld, Michael Wellman, Michael Dean White, Kamin Whitehouse, Brian Williams, David Wolfe, Bill Woods, Alden Wright, Richard Yen, Weixiong Zhang, Shlomo Zilberstein, および Prentice Hall の指名による匿名の査読者たち。

カバーについて

カバーは、著者によってデザインされ、Lisa Marie Sardegna と Maryann Simmons によって、SGI Inventor™ および Adobe Photoshop™ を使って作成された。カバーには、人工知能の歴史に現れる以下の項目が描かれている。

1. *De Motu Animalium* からの Aristotle (アリストテレス) のプランニングアルゴリズム (紀元前 400 年代)。
2. *Ars Magna* からの Ramon Lull の概念生成器 (西暦 1300 年代)。
3. 最初の汎用コンピュータのプロトタイプである Charles Babbage の階差機関 (1848)。
4. 一階述語論理の Gottlob Frege による記法 (1789)。
5. Lewis Carroll の論理推論の図式 (1886)。
6. Sewall Wright の確率ネットワークの記法 (1921)。
7. Alan Turing (1912–1954)。
8. Shakey ロボット (1969–1973)。
9. 近年の診断エキスパートシステム (1993)。
10. 原著: *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2002)。

著者紹介

Stuart Russell は、1962 年にイギリスのポーツマスで生まれた。彼は 1982 年にオックスフォード大学物理学科を主席で卒業し、1986 年にスタンフォード大学から、計算機科学の博士号を取得した。その後、彼はカリフォルニア大学バークレイ校のファカルティメンバとなり、現在は教授であると同時に、インテリジェントシステムセンター長であり、さらに、Smith-Zadeh 工学部学部長である。1990 年に、人工知能研究の功績により、NSF Presidential Young Investigator Award を受賞した。1995 年、彼は人工知能分野の最高の国際賞である Computer and Thought Award を受賞している。彼は、1996 年度のカリフォルニア大学 Miller 講座教授に、また、2000 年には学長講座教授に任命された。1998 年には、彼はスタンフォード大学の Forsythe 記念講演を行った。彼は米国人工知能学会のフェローであり、前理事である。彼は人工知能の幅広い分野で 100 編以上の論文を発表している。本書以外の著書には、*The Use of Knowledge in Analogy and Induction* (Pitman, 1989)、および Eric Wefald と共著の *Do the Right Thing: Studies in Limited Rationality* (MIT Press, 1991) がある。

Peter Norvig は、Google の検索品質部長である。また、彼は米国人工知能学会のフェローであり、前理事である。前職は、NASA Ames Research Center のコンピュータサイエンス部長職にあつて、NASA における人工知能およびロボティックスの研究を統括していた。さらにその前は、Junglee における研究主任の職にあり、そこでは、世界で最初のインターネット情報抽出サービスシステムの開発の手助けを行った。また、Sun Microsystems 研究所においては、知的情報検索に関する研究開発に従事した。彼は、ブラウン大学で応用数学の学士号を取得し、カリフォルニア大学バークレイ校で、計算機科学の博士号を取得した。彼は、南カリフォルニア大学の教授、バークレイ校での研究ファカルティメンバであった。彼は 50 を越える著作物を刊行した。その中には、著書 *Paradigms of AI Programming: Case Studies in Common Lisp* , *Verbmobil: A translation System for Face-to-Face Dialog* , および *Intelligent Help Systems for UNIX* が含まれる。

監訳者前書き

本書は Stuart Russell および Peter Norvig による *Artificial Intelligence—A Modern Approach (Second Edition)* の翻訳である。この第 2 版の出版は 2003 年であり、第 1 版の出版から 8 年を経過している。その間に、人工知能の研究も大幅に進展し、その結果、本改訂版はほぼ全編に及ぶ大幅なもので、新たな章の追加を始めとして、おそらく全書の半分くらいにまで及んでいる。

本書の翻訳出版は、第 1 版に引き続き、共立出版(株)にお引き受けいただいた。翻訳者については、これも第 1 版の場合と同様、章単位で選定することとした。本書の大幅な改訂に伴い、翻訳者の追加変更を行った。幸い、本書の優れた内容についての御理解をいただき、各翻訳者には快く翻訳作業を引き受けていただいた。さらに、翻訳者の中から数名の方々にお集まりいただき、翻訳についての方針を取り決めた。第 1 版と同様、原著の L^AT_EX ファイルを利用することとし、翻訳の品質の維持に注意を払ったことは、もちろんである。

大部分の訳語については第 1 版を継承したが、いくつかの訳語では、2005 年に共立出版から刊行された『人工知能学事典』を参考にした。

その他、書式上の細部について、以下のルールを設定した：

1. 原著本文中の太字は訳でも太字とする。原著本文中の強調のためのイタリックは、アンダーラインを付ける。
2. 人名は「ベイズの定理」や「チューリング機械」のように用語として一般化しているものはカタカナで表す。それ以外は、欧字のままとする。
3. 固有名詞も原則として欧字のままとする。
4. 重要語については、元の英語表現を括弧でくくって載せる。

各章の訳者は次のとおりである。

前書き	古川康一	(慶應義塾大学)
1 序論	中島秀之	(公立はこだて未来大学)
2 知的エージェント	鷲尾 隆	(大阪大学)
3 探索による問題解決	犬塚信博	(名古屋工業大学)
4 知識に基づく探索と探査	新田克己	(東京工業大学)
5 制約充足問題	横尾 真	(九州大学)
6 敵対探索	松原 仁	(公立はこだて未来大学)
7 論理のエージェント	佐藤泰介	(東京工業大学)
8 一階述語論理	佐藤泰介	
9 一階述語論理による推論	安部憲広	(九州工業大学)
10 知識表現	坂間千秋	(和歌山大学)
11 プランニング	山田誠二	(国立情報学研究所)
12 実世界におけるプランニングと行為	高玉圭樹	(電気通信大学)

13 不確実性	佐藤 健	(国立情報学研究所)
14 確率推論	本村陽一	(産業技術総合研究所)
15 時間を伴う確率的推論	佐藤泰介	
16 単純な意思決定	大和田勇人	(東京理科大学)
17 複雑な意思決定	大和田勇人	
18 経験からの学習	古川康一	
19 学習における知識	沼尾正行	(大阪大学)
	市瀬龍太郎	(国立情報学研究所)
20 統計的学習手法	麻生英樹	(産業技術総合研究所)
21 強化学習	寺野隆雄	(東京工業大学)
22 コミュニケーション	大沢英一	(公立はこだて未来大学)
23 確率的言語処理	乾健太郎	(奈良先端科学技術大学院大学)
24 知覚	牧 淳人	(京都大学)
25 ロボティクス	浅田 稔	(大阪大学)
26 哲学的基礎	橋田浩一	(産業技術総合研究所)
27 AI: 現在と未来	橋田浩一	
A 数学の諸概念について	渡辺 治	(東京工業大学)
B 言語とアルゴリズムについて の注意	渡辺 治	

本書は、原著者の前書きにもあるように、人工知能の主要な分野を網羅している。また、従来の教科書とは異なり、多くの最新の話題も含んでいる。そして、本書の表紙を飾る帯に“The Intelligent Agent Book”とあるように、全体が「エージェント」の観点から書かれている。そのため、記述全体に統一性が保たれ、異なった分野間の関連性も明らかになっている。本書は、全体を通じて、例を多く用いたわかりやすい記述になっていると同時に、背後にある理論を原理から丁寧に解説しているのだから、人工知能についての深い理解が可能である。

本書のタイトルの原文は、“*Artificial Intelligence—A Modern Approach*”であるが、翻訳にあたり、表紙の帯のタイトルを借用して、タイトルを『エージェントアプローチ人工知能』とした。もともとの副題である“A Modern Approach”の意味するところは、原著者の前書きに見られるように、「人工知能の各部分領域をそれらの独自の歴史的な文脈に沿って解説するのではなく、現在知られている事柄を共通の枠組みの中で再構築することを試みた」ということを反映している。すなわち、人工知能という膨大な分野を統一的な視点で捉えなおした力作である。そのため、本書は世界中から絶大な評価を得ていると聞いている。

以下は、本書の第1版に対する監訳者である筆者の前書きからの抜粋である。

「人工知能の研究が実世界の問題に対して期待されたほどの成果をあげえなかったことから、産業界から評価されない時期がしばらく続いたが、本書は、プランニングや機械学習などの記述に見られるように、その低い評価を見直すきっかけを与えるのに十分な内容を含んでいることも見逃せない。もちろん、人工知能の研究は日進月歩を遂げているので、とくに最先端の分野では既にその内容が古くなっているところも見受けられるが、人工知

能全体を見渡すには恰好な入門書である。ここしばらくは、本書を凌ぐ人工知能の教科書は出現しないのではなかろうか。」

この記述は、さらに強化された形で、そのまま第2版の監訳者前書きにも該当すると思われる。以下に原著者自身の第2版の前書きからも引用しよう。

「1995年当時に比べて、AIの果実は比較にならないほど実用技術として成熟してきたことを知らしめたい。たとえば、第1版でのプランニングアルゴリズムは高々数十ステップのプランしか生成できなかったが、本版でのアルゴリズムは数万ステップへと桁違いの性能を示している。同様の桁単位の改善は、確率推論、自然言語処理などの分野でも見られる。」

人工知能分野でのこのような発展が本改訂版に反映されているのは当然である。

最後に、本翻訳を完成させるのにお手伝いいただいた多くの方々に感謝したい。神戸大学の尾崎知伸氏には、Stuart Russell から送られてきた \LaTeX ファイルを日本の環境に合わせて、処理可能とするための調整をお願いした。ロンドン大学インペリアルカレッジの渡部浩昭氏、慶應義塾大学 SFC 研究所の五十嵐創氏には、一部の章の翻訳段階での下訳をお願いした(株)啓文堂の宮川憲欣さんには、 \LaTeX の処理すべてをお願いした。また、困難な索引づくりを実際に行っていただいた。さらに、最終段階での原稿の修正もお手伝いいただいた。最後に、本翻訳書の出版に向けて、監訳者を常に激励し、自ら編集作業を勢力的に進められた、共立出版(株)の小山透氏に深く感謝したい。

平成 20 年 6 月

監訳者 古川康一