
研究レポート

知能ロボットの現状と展望

梶川 嘉延*

1. はじめに

20世紀末はロボティクス分野においては歴史に残る画期的な出来事が多数あった。1つはご存じの方も多いと思うが、二足歩行ロボットASIMO (©HONDA) の誕生である。二足歩行ロボットの実現は20世紀中には不可能と言われていた中での突然の発表だったので、二足歩行ロボットの研究者の間には、まさに衝撃が走ったと聞き及んでいる。恐らく、ご覧になれた方々も多いと思うが、中に人間が入っているのではという表現が大げさとは思えないくらいスムーズな歩行を行い、その他、階段の昇降、ボールのキック、さらには走ることも最近では可能になってきた。

2つ目の出来事は、ロボットというよりも人工知能での出来事になるが、IBM社のDeep Blue (©IBM) というプログラムがチェスの世界チャンピオンのガリル・カスパロフ氏を破ったことである。このことは、一般には「ふーん、そうなの」程度のインパクトしかなかったかもしれないが、人工知能の分野では1956年のダートマス会議で人工知能 (Artificial Intelligence) という言葉が定義されて以来の大きな目標の達成という非常に画期的な、その後の人工知能研究の方向性を大きく変えるような出来事だったといえる。

これらのロボティクス分野での大きなブレイクスルーにより、20世紀末から現在に至る数年の間にさまざまなロボットが開発ならびに商品化された。その代表格は、犬型ロボットのAIBO (©SONY) であろう。初代AIBOはインターネット限定予約の3000台がわずか20分後に売り切れるといって、売り手のSONYですら予期しないほどの反響があった。これを皮切りにペットロボットブームが到来し、その動作性能や人とのインタラクションはこの数年でかなり洗練されたものとなった。また、研究分野においてもRoboCupのような世界プロジェクトも開始され、まさにロボット花盛りの状況である。

以上のここ数年の出来事からも、家事ロボットや介護ロボットなどの人間と密接に関わる (人間と共生する) ことになるロボットが身近になる日もそう遠くないよう喧伝されているが、果たして実際のところはどうかだろうか？ 特にロボットの知能は人間の知能に迫ることが出来るのだろうか？ 本稿では、ロボットに関わるさまざまな歴史について振り返るとと

*工学部 助教授

もに、知能ロボット研究の動向や人工知能技術について紹介し、最後に知能ロボットの今後について簡単に述べたいと思う。

2. ロボットの歴史（フィクション編）

実際のロボットや人工知能の歴史を述べる前に、まずはフィクションとくにSFや漫画の世界でのロボットの歴史について振り返ることは、非常に重要である。

表1 ロボットの歴史（フィクション編）

DC 3 世紀	ギリシャ神話に「青銅人間タロス」が登場する。
1813年	メアリ・シェリーが「フランケンシュタイン」を発表。その後のロボットSFに大きな影響を与える。
1883年	カルロ・コロローディが「ピノキオの冒険」を発表する。
1920年	チェコスロバキアの作家カレル・チャペックが『ロッサム万能ロボット会社R.U.R.』という本のなかで初めて「robot」という言葉を使う。
1926年	サイレント映画「メトロポリス」が製作される。マリアというロボットが登場し、日本でもヒットする。
1941年	アイザック・アシモフが短編「われ思う、ゆえに・・・」の中で「ロボット工学3原則」を発表。その後のロボットSFはもちろん、ロボット工学研究にも多大な影響を与える。
1952年	手塚治虫の「鉄腕アトム」が雑誌「少年」に連載される。他国とは異なるその後の日本におけるロボット観に大きな影響を与える。
1963年	「鉄腕アトム」がフジテレビ系列で放送開始。
1965年	「鉄人28号」がフジテレビ系列で放送開始。
1968年	アーサー・C・クラークの「2001年宇宙の旅」が放映される。人工知能を搭載したコンピュータHAL9000が登場。
1970年	藤子・F・不二雄の「ドラえもん」が連載開始。「鉄腕アトム」によって形成された人間とロボットの友情関係をさらに深めることに貢献する。
1977年	映画「スターウォーズ」が全米で公開される。R2-D2とC-3POというドロイドが登場する。
1979年	「機動戦士ガンダム」が名古屋テレビをキー局として放送開始。
1984年	映画「ターミネーター」が全米で公開される。
1987年	「スタートレック THE NEXT GENERATION」が全米で放映される。データというアンドロイドが登場する。その頭脳にはアシモフのロボット小説で登場する陽電子頭脳（ポジトロニック・ブレン）が使用されている。
2001年	映画「A.I.」が放映される。
2003年	新世代の「鉄腕アトム」の放送が開始される。

「ロボット」という言葉は表1にもあるとおり、カレル・チャペックの「R.U.R.」において初めて登場する。「ロボット」の語源はチェコ語の《robot (賦役)》であり、奴隷や労働者などを意味する。「R.U.R.」では人間のつらい仕事を人間の代わりにやってくれるロボットが出てくるが、最終的には人間に対して不満を抱き、人間に敵対していくことになる。このような人とロボットとの対立構造の根源は「フランケンシュタイン」にまで遡ることが

できる。「フランケンシュタイン」はご存知のとおりロボットではなく人造人間であるが、欧米人には「フランケンシュタイン」の影響が根強く残っており、フランケンシュタインコンプレックスとしてロボットには常に恐怖感を持つようになったといわれている。

その結果、欧米におけるその後のロボットは基本的にフランケンシュタイン型とピノキオ型に分類することができる。前者が人間に敵対するものとして、後者は人間になることを切望するものとして描かれるようになった。フランケンシュタイン型としては、近年では「ターミネーター」が有名である。一方、ピノキオ型としては「スタートレック」のデータ少佐や映画「A.I.」に出てくるロボットが当てはまるといえる。このように、欧米ではロボットは人間に敵対するもの、もしくは人間に疎まれながら人間を追い求めるものとして、かなりネガティブな印象がもたれている。このことは実際のロボット研究にも大きな影響を与えており、欧米ではロボット開発、特にヒューマノイドロボットの開発には消極的であるという見方もできる。

一方、日本では「鉄腕アトム」や「ドラえもん」など、人間と共存さらには友情関係を築いていくものや、「鉄人28号」や「機動戦士ガンダム」のようにヒーローものが多いため、ロボットに対してかなりポジティブな印象を持っている。そのことは、日本が1980年代に産業用ロボットで世界シェアの6割を得ていたことや、近年の二足歩行ロボットの開発、はたまた、ペットロボットのブームなどという形で現れている。そういう意味では、今後もロボティクス分野の研究・開発の中心のひとつは日本であることは間違いないと思われる。

なお、欧米においても「ロボット工学3原則」を提唱したアイザック・アシモフのロボットシリーズではロボットと人間との友情を描いているが、物語の世界ではやはりロボット排除の雰囲気が濃厚である。「ロボット工学3原則」を提案することで、物語に面白みが出たのも確かであるが、アシモフ自身がこのような拘束を加えないと心穏やかでなかったことも事実のようである。以下にロボット工学3原則を紹介する。

第一条 ロボットは人間に危害を加えてはならない。また、その危険を看過することによって、人間に危害を及ぼしてはならない。

第二条 ロボットは人間にあたえられた命令に服従しなければならない。ただし、あたえられた命令が、第一条に反する場合は、この限りではない。

第三条 ロボットは、前掲第一条および第二条に反するおそれのないかぎり、自己をまもらなければならない。

3. ロボットの歴史（ノンフィクション編）

次に実際のロボットに関わる歴史を見ていくことにしよう。

表2 ロボットの歴史（ノンフィクション編）

1946年	エッカートとモークリーが世界初のコンピュータENIACを開発。
1950年	チューリング（A.M.Turing）が知的活動をテストする方法としてチューリングテストを示しました。
1954年	デボルが「産業用ロボット」の特許を取得。
1956年	ダートマス会議が行われる。マカーシー（J.McCarthy）により“Artificial Intelligence（人工知能）”という言葉が使われる。
1962年	世界初の産業用ロボット「ユニメート」「パーサトラン」登場。
1965年	ザデー（L.A.Zadeh）がファジー集合を提唱。
1973年	世界初の人間型ロボット「WABOT-1」（ワボット-1）誕生。
1975年	ホーランド（J.H.Holland）が遺伝アルゴリズムという言葉をもとに機械進化の代わりに用いる。
1980年	ニューラルネットワークが広く用いられるようになる。 世界の産業用ロボット総数の約60%を日本が所有。
1982年	日本ロボット学会設立。
1985年	鍵盤楽器演奏ロボット「WASUBOT」（ワスポット）が、つくば科学万博で電子オルガン演奏を披露。
1986年	ブルックス（R.Brooks）がサブサンプションアーキテクチャーを提唱。 HONDAが二足歩行ロボットのプロジェクトを開始。 日本人工知能学会設立。
1990年	コザ（J.R.Koza）が遺伝的プログラミングを開始
1993年	SONYが「AIBO」のもととなるペットロボットの試作機を作る
1996年	HONDAが世界初の人間型自律二足歩行ロボット「P2」を発表。
1997年	HONDAが完全自律人間型二足歩行ロボット「P3」を発表する。世界の研究者たちに衝撃が走る。 IBMのコンピュータ「ディープブルー」がチェスの世界チャンピオンのガリル・カスパロフに勝利する。人工知能研究の転換点となる。 次世代ロボティクスの世界プロジェクト「RoboCup」の第一回大会が開催される。
1999年	SONYの犬型ロボット「AIBO」の発売を皮切りにペットロボットブームが到来。
2000年	HONDAが人間の生活空間で活動することを想定した二足歩行ロボット「ASHIMO」を発表。
2003年	SONYが二足歩行エンターテイメントロボット「QRIO」を発表。
2006年	愛知万博においてさまざまなロボットが展示。

表2では、世界初のコンピュータENIACが登場してからの歴史を示している。これ以前にも、「茶運人形」のようなからくり人形や自動アヒルなど自動機械が開発されているが、現在の意味でのロボットとは多少異なるため省いている。また、人工知能とロボットの研究は初期の段階では独自の歴史を辿っている。

まずロボットは産業用ロボットとして登場することになる。しかし、登場当初はロボット

というよりも、サーボ技術の延長であったといえる。その後、さまざまな改良がなされ、1980年代に産業用ロボットは全盛期を迎えることになる。

そして、研究開発の面では1970年代頃から人間型ロボットに関連した基礎研究が中心となってきた。その研究成果の第一号が早稲田大学で開発された「WABOT-1」であった。機能としては、人工の口により人間とのコミュニケーションを簡単な日本語の会話で行い、遠隔受容器としての人工の耳・目により対称物を認識し距離・方向を測定し、二足歩行によって移動し、触覚を有する両手で物体の把握・移動などの作業を行うことが可能であった。しかし、一歩の動作に45秒程度かかるなど、まだまだ二足歩行ロボットの道のりは険しいものであった。

その後、一歩の動作にかかる時間は短縮されていくことになるが、人間のような歩行にはまだまだ及ばなかったが、1996年に突然、HONDAが人間型自律二足歩行ロボット「P2」を発表した。その動作はまさに中に人間が入っているのではと疑いたくなるようなスムーズなもので、世界中の研究者たちに衝撃が走った。そして、この「P2」の発表を皮切りに、二足歩行ロボットの性能は日進月歩の勢いで向上し、現在ではSONYの「QRIO」、HONDAの「ASHIMO」、北野共生プロジェクトの「Morph」、富士通の「HOAP」、産総研の「HRP-2」など非常に高性能なヒューマノイドロボットが誕生している。

また、これと同時に「AIBO」などを中心にペットロボットブームが到来したのも記憶に新しい。このようにロボット、特にその機構部の技術はいつでも人間と共生することが可能な程度にまでレベルが上がっているともいえる。

一方、人工知能やロボットの知能に関する歴史を振り返ってみると、人工知能関連技術の研究はENIAC登場を皮切りに、これまで哲学・数学・論理学・心理学などの分野で論じられていた「人間の知的活動を行う機械」を作る試みがいくつも行われるようになった。そして、1956年にはマカーシーが発起人となった“ダートマス会議”で、この研究分野が“Artificial Intelligence (人工知能)”と呼ばれるようになった。

この初期の時期(1960年代)の人工知能の研究は成功の連続であった。それまで、単なる計算しかできなかったコンピュータが少しでも知的なことができるのは驚異的なことで人工知能の春ともいべき時期で、今では少し否定的な意味を込めて「Good Old Fashioned AI (古き良き人工知能)」と呼ばれている。そして、1958年にシモンは10年以内にコンピュータはチェスチャンピオンに勝利することや、新たな数学の定理が証明されることを予見し、人工知能の未来は明るいかに思われていた。

しかし、少数の例ではうまく動作した方法が大規模な問題には適用できないことが1970年代に明らかになった。問題の一つ目は初期のAIプログラムが単純な操作だけで動作し、対象に関する知識を持っていなかったことである。二つ目は規模の問題であった。プログラムが原理的に解を持つことと、プログラムが実際に解を得ることができることは別だったのである。三つ目は、知的構造を生み出すための基本構造の限界が指摘された。そこで、どん

な問題でも解くことのできる汎用のシステムではなく、対象領域の知識を十分に用いたシステム（エキスパートシステム）によって、これらの問題を解決する試みが行われるようになった。

1980年代になると、人工知能分野におけるさまざまな手法やアルゴリズムが実用化されるようになった。例えば、この時期にはニューロやファジィなどが家電製品などでも使われるようになり、これらの用語が商品名や機能に含まれているかどうかによって売り上げが変わるほどになった。こうして、1970年代の人工知能分野の衰退からようやく脱却できる兆しが見えてきたが、画期的なブレイクスルーは未だ起こる様子はなかったといえる。

ところが、1997年にIBMのコンピュータ「ディープブルー」がチェスの世界チャンピオンのガリル・カスパロフに勝利し、1958年にシモンが予見した年から遅れることまさに30年で人工知能研究の第一目標が達成されたのである。その結果、人工知能分野の次の目標はロボット技術と融合した知能ロボットの研究に焦点が移っていった。

ここでいう知能ロボットはまさに人間と同等の能力を有するロボットのことを指しており、その大きな目標に対して「RoboCup」という世界プロジェクトが動き出した。「RoboCup」は「ロボットによるサッカー」を研究課題にし、ロボット工学や人工知能の研究を推進するための国際プロジェクトの一つである。目標は2050年までに人間の世界チャンピオンチームに勝つ自律ロボットチームを作ることである。現在は、世界36カ国から3,000人以上の研究者や学生が参加しており、国際的な組織にまで発展している。また、競技はサッカーだけでなく、大規模災害へのロボットの応用としてレスキュー、次世代の科学技術の担い手を育てるジュニアなどが行われており、ロボット研究の啓蒙活動にも余念がない。

4. 知能ロボットにおける知能に関わる諸技術

ロボットの研究は「ASHIMO」や「AIBO」などのようにその機構部の技術はかなり洗練されたものになってきている。しかし、人間と同じような知能を搭載しないことには知能ロボットと呼ぶことができない。では、知能ロボットの頭脳となる諸技術の現状はどのようなになっているのだろうか？

現在、知能ロボットの頭脳に当たる人工知能技術としては、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、強化学習など多数の手法やアルゴリズムがある。これらすべてを述べることはできないので、以下では代表的な技術である遺伝的アルゴリズム、ニューラルネットワーク、そして強化学習について、その概要と利点・欠点を以下に簡単にまとめるに留めておく。詳細は参考文献などを参照いただきたい。

○遺伝的アルゴリズム（GA）

[概要]

GAはダーウィンの進化論をモチーフとした人工知能技術の一つである。GAでは多数

の遺伝子（パラメータ）の異なる個体をランダムに発生させ、それらの個体が目的に対してどの程度有効であるかを数値的に評価し、その数値に応じて淘汰・交叉・突然変異を行い、最良の個体を見つけ出す。ようするに、できの悪い個体は淘汰し、また、それぞれの個体の遺伝子を持った新たな個体を交叉によって生成し、遺伝子を急激に変更しまったく新しい個体を生み出すことによって、優秀な個体を次世代に残していくようなアルゴリズムである。これは人工知能技術というよりも最適化手法の一種として捉えるほうが適切であるが、近年のエンターテインメントロボットの一部には搭載されているアルゴリズムの一つである。

[利点]

GAが最も得意とするのは、色々考えられる答えの中から、最も良い答えを見つけ出すことである。特に答えの選択肢が多くなればなるほどGAの有用性が光ってくる。なぜなら、答えの選択肢が多くなるほど、すべての選択肢を一つ一つチェックすることが現実的に困難になる（NP完全）からである。

[欠点]

GAはひとつの問題に対して、異なるパラメータをもったたくさんの個体を生成する必要がある。そのため、最終的な答えが得られるまでに多くの時間を要するため、リアルタイムで学習するという問題には適さない。よって、知能ロボットに適用するにはかなりの工夫が必要なため、GAだけで知能ロボットを構築することは非常に困難であるといえる。

○ニューラルネットワーク

[概要]

ニューラルネットワーク（NN）は生物の神経回路網をモデル化してコンピュータ上に実現した人工知能技術である。実際の神経回路網と同様に多数のニューロン(ユニット)をネットワークで結び、その入力ユニットへの刺激をネットワークを通じて後段のユニットに次々と伝播していき、最終的に出力ユニットから入力刺激に対応する信号や解答を出力する。NNを利用するためには、まず、多数の入力とそれに対応する教師（解答）を用意して、NNを学習する必要がある。そして、十分に学習したNNは、学習した入力だけでなく未学習の入力に対しても正しい信号や解答を出力することができる。

[利点]

NNが最も得意とするのは、いわゆるパターン認識である。ある入力パターンに対してそれに対応するパターンを出力するといった問題を得意とする。例えば、りんごの画像を入力とし、その出力を「りんご」というふうに画像名を出力するシステムを比較的容易に構築することができる。

[欠点]

NNでは必ず教師による学習が必要となる。すなわち、NNを利用する前にいくつかの入力とそれに対応する答えのパターンとで学習を行わなければならない。そのため、教師によって答えを教えることができないような問題には対応することができない。そのため、人間が知らないもしくは行ったことのないような未知の状況に送り出す自立型ロボットの頭脳にはあまり適さないといえる。

○強化学習

[概要]

強化学習は、自分で自分のした行動を評価し、それに基づいて自分の行動を反省し、正しい行動へと修正していく人工知能技術である。具体的には、最終的な目標のみが提示され、その目標達成に対して自分が行いうるさまざまな行動を繰り返し、その一連の行動の中から目標達成に直接もしくは間接的に関連している行動を強化していく。目標達成時には報酬が与えられ、その報酬を目当てに自律学習するアルゴリズムといえる。また、学習の際には目標達成の報酬だけでなく、目標未達成に対するペナルティーなども与えることで、その学習効率を上げることも可能である。

[利点]

強化学習に必要なものは最終目標を提示することだけである。そのため、NNとは異なり教師の必要性がないといえる。よって、あらかじめどのような行動が正解かわからない、しかも、ひとつの場面での行動だけから成否の結果をだすのではなく、一連の流れの中で成否をだし、それに基づき学習することができる。このような性質から、現在のところ最も知能ロボットの頭脳として有力な人工知能技術の一つである。

[欠点]

強化学習には報酬やペナルティーが必要であるが、何を成功とするのか、報酬をどのように分配するのかなどを決め込むという、結構厄介な問題がある。また、強化学習は基本的に試行錯誤を繰り返しながら学習していく技術なので、「試行錯誤」が許されないような場合には適用できないという問題点を有する。

以上、三種類の人工知能技術を簡単に紹介したが、どの技術も一長一短があり、決定的な（知能ロボットの頭脳になる）人工知能技術は現在のところ、存在しない。しかし、強化学習などは「AIBO」の学習などに用いられるなど、少しずつであるが、ロボットへの導入が進んでいるのも事実であることから今後の展開が楽しみである。

5. 知能ロボットが身近になる日はいつか？

最後に「知能ロボットが身近になる日」がいったいいつ頃になるのか、知能ロボットの現状や克服すべき課題を眺めながら考えてみたいと思う。知能ロボットはさまざまな要素技術が組み合わされて初めて実現されるが、すべての要素技術を紹介することはできないので、ここでは人との共生に関わる要素技術に絞って簡単に眺めてみたいと思う。

○音声認識

人との共生を考えた場合、人間からロボットへの指示は主に音声によってなされることが予想される。よって、ロボットは人間の音声を認識し、理解する必要がある。音声認識技術の現状は、騒音の少ない状況であればかなりの精度で認識することができるようになってきている。しかし、ロボットに搭載することを考えた場合、当然、非常に騒音の多い場面も想定されるだろうし、また、たくさん人間がいる場合に、その中から自分に対して話しかけている相手を識別する必要もある。このような問題はカクテルパーティー効果と呼ばれ、人間の場合であれば、パーティーのような騒然とした環境においても自分が注視している相手の音声を聞き取ることができる。よって、このような環境下での対象の識別と認識率の向上が必須である。近年、このような過酷な環境でも高い精度で認識できるロボットとしてNECの「PaPeRo」がある。「PaPeRo」ではさまざまな音響信号処理技術が導入されており、家庭内でのモニター実験においても高い精度で認識できることが実証されている。ロボットの音響関連技術については著者が企画した日本音響学会誌の「ロボットにおける音響技術」を参照されたい。

○画像認識

人が生活する空間にロボットが入る込むためには、視覚情報を明確かつ効率的に得る必要がある。画像認識技術の現状は、物体の抽出や色の識別などかなりの精度で行えるようになってきたが、ロボットの場合は得られた画像情報から物体を抽出するだけでなく、その物体が何かを理解する必要がある。また、リアルタイムでの認識・理解が必要となる。このような技術は古くから議論されてきたが、いまだ決定的な解決策は見出されていないのが現状である。

○状態認識

人との共生はロボットにたいして、常に環境の変化を強いることになる。産業用ロボットなどのように決められた環境でのみ動作する場合であれば、自分のおかれた状況を認識することは比較的容易であるが、環境が時々刻々変化するような状態を認識することは非常に困難である。しかし、人との共生を目指すためには、自分が今どのような状況

にいるのかを明確かつ高速に理解する必要がある。また、センサ情報をすべて利用するのではなく、それら膨大な情報から必要な情報を抽出する技術の開発も必要となる。

○安全性

人との共生においては、人と接触する機会が非常に多くなる。そのような場合、当然、人に対して危害を加えることがないように安全面での研究も重要になってくる。ロボットの材質はもちろん、ショックを吸収するためのアクションなどまだまだ課題は山積みであるといえる。そして、ロボット自身がすぐに壊れないように頑健にする必要があるという相反する要求もクリアする必要がある。

○知能

未だ人間の頭脳に迫るような技術は開発されていない。恐らく、人間の脳を解明しない限りは永遠に人間に近づくことは難しいかもしれない。また、現状の技術とはまったく異なった原理の人工知能技術が生まれない限り、ロボットとの共生はかなり限られた領域にならざるを得ないのかもしれない。知能には、知識のようにルール化できるものもあれば、感情・感性などルール化できないものもある。特に後者の知能は人との共生では欠かせないものといえる。ごく簡単な感情や感性を猿真似的に行う技術はあるが、真に感情や感性を理解し、また、表現する知能の研究は21世紀の大きな課題のひとつといえるだろう。

以上、非常に限られた範囲で知能ロボットに関わる現状と課題を述べたが、結論から言うと5年、10年で人と共生する知能ロボットが出現することは非常に困難だといえる。そのようなロボットが現れるのは恐らく21世紀中ごろ以降になると思われる。しかしながら、限られた目的を持つロボット（例えば、掃除ロボットなど）は近い将来、一般家庭に入る込むことは間違いないといえるかもしれない。

6. おわりに

「知能ロボットが身近になる日」について、ロボットや人工知能の歴史をフィクションおよびノンフィクションとで振り返るとともに、現状の知能ロボット技術について概観することで、考えてみた。前節で述べたようにそのような日が訪れるのはまだまだ先のことになるように思われるが、知能ロボット関連の技術の進展には目覚ましいものがあるのも事実である。したがって、突然のブレークスルーによってSFの世界でしか登場しなかったようなロボットたちが身の回りに溢れかえる日が突然訪れることも、まったくの夢物語とはいえないかもしれない。今後もロボティクス分野の研究動向から目が離せない。

参考文献

- NHK人間講座 ロボットから人間を読み解く, NHK出版, 1999.
- 森川幸人, マッチ箱の脳, 新紀元社, 2000.
- 有本卓, ロボットにかける夢, 岩波書店, 2000.
- ピーターメンゼル他, ロボサピエンス, 河出書房新社, 2001.
- 月本洋, ロボットのこころ, 森北出版, 2002.
- 藤原和博, 人生の教科書「ロボットと生きる」, 筑摩書房, 2003.
- 福田敏男, 鉄腕アトムのロボット学, 集英社, 2003.
- 日高俊明, トコトンやさしいパーソナルロボットの本, 日刊工業新聞社, 2003.
- RoboCup公式ホームページ, <http://www.robocup.org/02.html>.
- 人工知能学会ホームページ, <http://www.ai-gakkai.or.jp/jsai/whatsai/>.
- 映画「A.I.」ホームページ, <http://aimovie.warnerbros.com/japan/>.
- 日本音響学会誌63巻1号, 「ロボットにおける音響技術」, 2007.