

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第1部 研究・技術動向
他言語論題 Title in other language	Part1 Trends in Research and Technology
著者/所属 Author(s)	服部 宏充 (HATTORI Hiromitsu) / 立命館大学大学院情報理工学研究科 准教授 ほか
書名 Title of Book	人工知能・ロボットと労働・雇用をめぐる視点: 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Perspectives on Artificial Intelligence/Robotics and Work/Employment)
シリーズ Series	調査資料 2017-5 (Research Materials 2017-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2018-03-30
ページ Pages	5-42
ISBN	978-4-87582-814-3
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
キーワード keywords	—
摘要 Abstract	知識処理・機械学習、ロボットといった、人工知能・ロボットに関連する技術 (3分野9項目) について、研究・技術動向を紹介する。

調査報告書『人工知能・ロボットと労働・雇用をめぐる視点』は、国立国会図書館調査及び立法考査局による科学技術に関する調査プロジェクトの一環として、外部に委託し実施した調査研究の成果報告書です。掲載した論文等は、全て外部調査機関及び外部有識者によるものです。国立国会図書館の見解を示すものではありません。

第1部 研究・技術動向

【要 旨】

現在の人工知能（Artificial Intelligence: AI）ブームを受け、機械学習などのブームをけん引する分野にとどまらず、関連する幅広い技術分野に対して、過去数年にはない熱い視線が注がれ、情報通信技術（Information and Communication Technology: ICT）に対する社会の関心は高まっている。AIをめぐっては、これまで、ブームとその反動による冬の時代を繰り返しており、過剰な期待には慎重になる必要がある。AIを含むICTだけでなく、新しい技術一般に言えることであるが、技術は、社会の様々なニーズに対応し、社会を変えていく一方で、同時に課題も生み、社会はこれに対応することが求められる。現在のAIブームを一過性のものとしなないためには、AIが社会との相互作用の中で発展し、利用されるという認識が重要である。

AIに関連する技術は細分化しており、その全てを網羅することは難しい。そこで、第1部では、①知識・データ処理に関する分野、②人間と機械の境界に関する分野、③産業や生活に関する分野の3分野から次の9つの技術を概説する。

①知識・データ処理に関する分野

現在のAIブームをけん引する技術である知識処理・機械学習に加え、その影響を受けて著しい発展を見せる自然言語処理及び画像獲得・認識を取り上げる。

②人間と機械の境界に関する分野

AI、ロボットの利用や普及に当たって、人間と機械の間の情報伝達の重要性が高まっている。これを担う音声インタフェースや、人間と機械の相互作用を扱うヒューマンエージェントインタラクションを取り上げる。

③産業や生活に関する分野

産業や生活を変え、社会に浸透しつつあるロボットやIoT（Internet of Things: IoT）に加え、新しい社会の仕組み・制度を設計、運用するための基盤技術であるマルチエージェントシステム及びクラウドソーシングを取り上げる。

これらの3分野9つの技術について、注目されるに至った社会的な背景、国内外の技術動向、実社会への応用や有望な応用領域を説明し、今後生じ得る社会的課題を整理する。

I 知識処理・機械学習

1 歴史的背景

人工知能 (Artificial Intelligence: AI) ⁽¹⁾ の歴史 ⁽²⁾ を振り返ると、幾つかの要素技術がそれぞれの時代で研究されてきた。1960年代は、知的作業を様々な事項の組合せにより表現し、その中から適切な解をいかに効率よく探すかという課題 (「探索問題」という。) が、AI研究の中心として取り組まれた ⁽³⁾。例えば、将棋を指す場合、様々な指し手の組合せの中から、勝利につながる指し手を効率よく探すことが求められる。それを探するための手法が「探索」⁽⁴⁾ という技術である。しかし、例えば将棋の差し手の組合せを考えてみても、その数は膨大になり探索は容易でない ⁽⁵⁾。一方、翻訳などを行う際には、単純な構文の組合せ操作だけではなく、翻訳の対象となる分野に関する知識も必要となる。そのため、新たなアプローチが求められるようになった ⁽⁶⁾。

人間は、様々な知識を持ち、知識を利用することで、的確かつ効率的に問題を解決することができる。例えば、将棋のプロ棋士であれば、定跡などの知識を利用することで差し手の候補を絞り込むことができる。AIにおいて、このような知識を用いる技術は「知識処理」⁽⁷⁾ と呼ばれ、1970年代に注目され研究が進められた ⁽⁸⁾。この技術は、血液感染症診断システム「マイシン (MYCIN)」⁽⁹⁾ や、有機化合物の構造推定システム「デンドラル (DENDRAL)」⁽¹⁰⁾ などで広く使われ、1980年代に起こったエキスパートシステム ⁽¹¹⁾ を中心とする AI ブームを支える要素技術となった。エキスパートシステムは、日本でも、鉄鋼業界などで積極的に導入された ⁽¹²⁾。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、2018 (平成 30) 年 2 月 26 日である。

(1) AIとは、「知的な機械、特に、知的なコンピュータプログラムを作る科学と技術」などと定義される。ただし、研究者によってその定義は異なり、また「知能」や「知性」が定義されていないことから、人工知能を定義することもまた困難であると言われている。「人工知能のFAQ」人工知能学会ウェブサイト〈<http://www.ai-gakkai.or.jp/whatsai/AIfaq.html>〉; 総務省編『情報通信白書 平成 28 年版』2016, pp.233-234. 〈<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/n4200000.pdf>〉

(2) 1956年に米国で開催されたダートマス会議において、人工知能という学術分野が確立された。「人工知能の歴史」人工知能学会ウェブサイト〈<http://www.ai-gakkai.or.jp/whatsai/AIhistory.html>〉

(3) 「知能発現の源は探索にあるとし、探索の効率化を中心課題としていた」。人工知能学会編『人工知能学大事典』共立出版, 2017, pp.5-6. (石塚満ほか「(人工知能基礎) 総論」)

(4) 同上, pp.12-14. (石塚ほか「探索」)

(5) この問題は「組合せ爆発」と呼ばれ、初期の AI 研究における大きな問題点となった。英国では 1973 年、科学研究に対する政府助成の審議を行っていた科学研究会議 (Science Research Council: SRC) のシンポジウムにおいて、この問題への理解不足が指摘され、英国政府の AI 研究予算が大幅に削減されるきっかけになったと言われる。Stuart Russell and Peter Norvig (古川康一監訳)『エージェントアプローチ人工知能 第 2 版』共立出版, 2008, p.22. (原書名: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd ed., 2002.)

(6) 同上, p.21. 米国では当時、最先端の科学技術論文が書かれていた英語とロシア語との間の機械翻訳が精力的に研究されていたが、全米科学アカデミーの自動言語処理諮問委員会 (Automatic Language Processing Advisory Committee: ALPAC) が 1966 年に「直ちに実現する見込みはない」と答申 (ALPAC, "Language and Machines: Computers in Translation and Linguistics," 1966, p.24. 〈<http://www.mt-archive.info/ALPAC-1966.pdf>〉) したため、新たな方向性が模索されていた。

(7) 「知識処理」は、知識をどう表すべきか論じる「知識表現」、表現された知識をどのように思考として使うかを論じる「推論」などの分野に細分化される。同上, 第 3 部「知識と推論」などを参照されたい。

(8) 人工知能学会編 前掲注(3), pp.6, 8. (石塚満ほか「(人工知能基礎) 総論」)

(9) Bruce G. Buchanan and Edward H. Shortliffe, *Rule Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*, Massachusetts: Addison-Wesley, 1984. 〈<http://people.dbmi.columbia.edu/~ehs7001/Buchanan-Shortliffe-1984/MYCIN Book.htm>〉

(10) Robert K. Lindsay et al., "DENDRAL: A case study of the first expert system for scientific hypothesis formation," *Artificial intelligence*, Vol.61 No.2, 1993.6, pp.209-261. (〈<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/30758/0000409.pdf>〉)

(11) 知識を利用して、専門家と同様な判断をするシステム。

(12) 土屋俊ほか編『AI 事典 第 2 版』共立出版, 2003, p.11.

しかし、当時 AI で知識を利用するためには、聞き取りなどによって知識を詳細に調べ上げるなど人手による膨大な作業が必要であったため⁽¹³⁾、知識処理技術は、主に規模の大きな産業分野での利用に限られた。

こうした経緯から、AI が自ら知識を獲得するための技術、すなわち「学習」の技術が AI にとって必要なものと考えられるようになった⁽¹⁴⁾。機械が自動的に知識を学習する技術は、「機械学習」と呼ばれ、現在の AI ブームを支える重要な技術となっている。

以上のように、探索、知識処理、機械学習は、現在の AI に欠かせない要素技術となっている。以下では、特に近年発展が著しい知識処理と機械学習について説明する。

2 知識処理の現状

1980 年代の知識処理技術では、知識構築の方法論が未確立であり、知識の再利用性などの点で大きな問題があったが⁽¹⁵⁾、その後の研究により現在の状況は大きく異なっている。様々な知識を記述するための概念を体系化したもの（オントロジー）⁽¹⁶⁾を利用することで、知識の構築論が整備され、知識の記述や再利用が容易になった。さらに、インターネットの普及、オープンガバメント・オープンデータ⁽¹⁷⁾の流れなどにより、知識を独自に作成しなくとも、様々な知識がインターネット上で容易に取得できるようになってきた。

現在、記述した知識をコンピュータが理解できるようにするための「リンクトデータ（Linked Data）」と呼ばれる形式⁽¹⁸⁾が普及し、その形式で様々なデータが公開されている⁽¹⁹⁾。リンクトデータを用いると、連想ゲームのように関連した事項をたどることができ、関連する多くの知識を集めることができる。例えば、NHK では番組情報をリンクトデータとして提供する試みを行った⁽²⁰⁾。この試みでは、ユーザがいる地域と、その地域に関連した動画とを結び付けることができ、関連する知識を幅広く利用することができるようになる。また、富士通研究所では、公開されているリンクトデータを収集し、一括で検索できるようなシステムを作成している⁽²¹⁾。

リンクトデータなどを集約することで、知識のデータベースを作成することができる。このような知識のデータベースは、「知識グラフ」と呼ばれる⁽²²⁾。知識グラフは、例えば物・人・場所などの関係を示した知識を大量に集約したものであり、様々な疑問に答える質疑応答システムやウェブ検索システムを作成する際に必須のものとなっている。例えば、IBM 社の場合、

(13) この問題は、知識獲得ボトルネックと呼ばれる。人工知能学会編 前掲注(3), p.280. (元田浩ほか「(機械学習とデータマイニング) 総論」)

(14) 同上

(15) エキスパートシステムで利用する知識は、適用する施設ごとに構築する必要があり、非効率的であったため、各施設で知識を共有し、再利用することが求められた。同上, p.1256. (溝口理一郎「知識工学の誕生とエキスパートシステム」)

(16) 同上, pp.1259-1260. (來村徳信「オントロジーとスキーマ」)

(17) オープンガバメントとは、インターネットを活用し政府を国民に開かれたものにしていく取組である。オープンガバメントでは行政機関の透明性を高めるため、行政機関が保持するさまざまなデータが公開される（オープンデータ）。「オープンガバメントとは?」OpenGovLab ウェブサイト〈<http://openlabs.go.jp/whatis/>〉

(18) 人工知能学会編 前掲注(3), pp.1316-1318. (武田英明「Linked Open Data (LOD) 基礎」)

(19) 次のウェブサイトで、公開されているデータの状況を確認することができる。Andrejs Abele and John McCrae, "The Linking Open Data cloud diagram," Insight Centre for Data Analytics Website 〈<http://lod-cloud.net/>〉

(20) 「NHK Linked Data API サービスのご案内」NHK 放送技術研究所ウェブサイト〈<https://www.nhk.or.jp/str1/ld/>〉 なお、同サービスは調査・研究が目的のため期間限定で実施された。

(21) "LOD4ALL." 〈<https://lod4all.net/ja/index.html>〉

(22) 2012 年にゲージル社が発表した知識グラフに関しては次が詳しい。人工知能学会編 前掲注(3), p.1314. (川村隆浩「メタデータの活用」)

同社のAIシステム「ワトソン (Watson)」において、ウェブ上のフリー百科事典「ウィキペディア (Wikipedia)」などから作成された知識グラフを用いており、これが人間の代わりに質問に答えるシステムの中核技術となっている⁽²³⁾。

グーグル、フェイスブック、マイクロソフトなどのIT企業は、自ら知識グラフを作成している⁽²⁴⁾。これを更に大規模なものとするためには、正確な知識グラフを自動的に作る技術が必要であり、AI研究者の間で重要な研究テーマとなっている。

3 機械学習の現状

機械学習は、学習能力を持つAIを実現するための研究分野の一つである⁽²⁵⁾。人間は、学習能力を持ち、知識を新たに獲得することができる。例えば、人間の子供は、猫を見た際に親から「猫がいるよ」と教えてもらうことにより、猫には耳があるなどの特徴を学習し、次に猫を見た際に、そこにいるのが猫であると識別するための知識を獲得できる。AIも機械学習により同様の能力を持つことが期待されている。機械学習の枠組みとして様々なものが考えられているが、その中で「例からの学習」がよく利用されている⁽²⁶⁾。これは、機械に対して例を与えることで、その例に共通する特徴を知識としてデータから抽出するものである。近年、インターネットの発達、大規模データベースの整備により、巨大なデータが容易に利用できる環境が整ったことに加え、機械学習の技術自体も進展しており注目を浴びている。

機械学習の技術の一つに、深層学習 (ディープラーニング) がある⁽²⁷⁾。人間の脳を構成する無数の脳神経細胞 (ニューロン) のネットワークを模した「ニューラルネットワーク (Neural Network)」⁽²⁸⁾ という学習技術が長年研究されてきたが、それを発展させたものである。深層学習では、階層状に積み上げた構造を数学モデルで表現し、入力したデータのある層で処理し、その出力を他の層で処理することを繰り返すことで、そのデータの特徴を学習する。従来のニューラルネットワークでは、階層が多く (深く) になると学習がうまくできなかったが⁽²⁹⁾、近年、深い階層でも学習できる技術が開発され⁽³⁰⁾、深層学習として利用されるようになった。

深層学習では、階層を深くすることで、データに存在する特徴を階層的に抽出できるようになり、その結果、学習の精度が向上した⁽³¹⁾。例えば、従来の機械学習では、猫の画像を認識する際に、あらかじめ耳があるか否か、髭があるか否か、色は何色か、といった特徴を人間が機械に与えなければならなかったが、深層学習では画像データを与えるだけで、耳や髭といった特徴を低い階層で抽出し、高い階層でそれらを統合して猫であると判断するといったように、その特徴を階層的に抽出することができる。

(23) Jose Manuel Gomez-Perez et al., "Enterprise Knowledge Graph: An Introduction," Jeff Z. Pan et al., eds., *Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organisations*. Cham: Springer, 2017, p.9.

(24) Heiko Paulheim, "Knowledge Graph Refinement: A Survey of Approaches and Evaluation Methods," *Semantic Web*, Vol.8 No.3, 2017, pp.489-508. (<http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj1167.pdf>)

(25) 人工知能学会編 前掲注(3), p.280. (元田浩ほか「(機械学習とデータマイニング) 総論」)

(26) 同上, pp.281-283. (元田浩ほか「(機械学習とデータマイニング) 総論」)

(27) 同上, pp.532-534. (麻生英樹「ディープラーニング (深層学習)」)

(28) ニューロン間で信号が伝達される機構を簡単な数式の組合せで表現し、この数式に例を与えることで学習させる手法。Russell and Norvig 前掲注(5)の第 20.5 節も参照。

(29) 勾配消失問題と呼ばれる。人工知能学会編 前掲注(3), pp.521-522. (浅川伸一「リカレントニューラルネットワーク」)

(30) 同上, pp.532-534. (麻生英樹「ディープラーニング (深層学習)」)

(31) 2012年に、画像の中に何が写っているかを認識する一般物体認識コンテストにおいて、深層学習を使った場合に大幅に精度が上がったことで大きな注目を浴び、現在の深層学習ブームのきっかけとなった。

深層学習は、大量のデータが利用可能であれば精度を高めることができ、特に画像認識や音声認識といった分野で精度が向上した。深層学習は、データを大量に保有するグーグル、フェイスブック、マイクロソフトなどのIT企業を中心に研究が進められており⁽³²⁾、日本においてはプリファード・ネットワークス (Preferred Networks) 社などで実用化が進められている。

機械学習の別の手法である「強化学習」⁽³³⁾も、近年注目を集めている。例えば動物は、ある一連の行動を実行した後に、餌が与えられるなどの報酬を得られると、その行動の選好度が強化される。強化学習は、この仕組みを模倣した学習手法である。近年、強化学習を深層学習と組み合わせることにより、より高度な学習ができるようになってきている。例えば、グーグル傘下のディープマインド (DeepMind) 社は、深層学習、強化学習、探索などの技術を組み合わせることにより、囲碁のトップ棋士よりも強い囲碁AIの開発を行っている⁽³⁴⁾。

4 今後の課題

現状では、知識処理と機械学習のどちらかだけで高度なAI技術が実現できるわけではなく、両者を相補的に利用することで実用的なAI技術が実現可能となっている⁽³⁵⁾。

知識処理は人間の知識を用いるため、人間がその仕組みを容易に理解できるという利点がある。責任を伴う意思決定などにAI技術を用いる場合には、意思決定者が決定の意味を理解する必要があるため、このような技術が必要となる。また、知識処理では、明示的に人間の意思をAIに反映させることや、データにない特殊な事例の扱いを事前に設計することが可能である。例えば、災害などのまれに起こる事象では、データを事前に得ることができないが、人間の知識を組み込むことで、その場合の対応をAIに実装することができる。その一方で、分野によっては知識の作成、取得などが困難なため、更なる技術開発も必要とされている⁽³⁶⁾。

機械学習は、データが大量にあれば知識を自動的に構築できるという利点がある。そのため、データが豊富に得られる場合には、人間の判断を上回る精度で意思決定をすることが可能となる。しかし、深層学習のような技術を用いた場合には、意思決定の理由が説明困難であるという問題が生じる⁽³⁷⁾。また、データが少ない分野や、データが網羅的に集められない分野に対しては機械学習の適用が難しく、それに対応するための更なる技術開発が必要となる⁽³⁸⁾。

(32) 深層学習の開発を先導したカナダのトロント大学名誉教授ジェフリー・ヒントン (Geoffrey Hinton) 氏や、米ニューヨーク大学教授のヤン・ルカン (Yann LeCun) 氏が、それぞれグーグル、フェイスブックで勤務するなど、企業は大学の研究成果を熱心に取り入れている。

(33) Russell and Norvig 前掲注(5)の第21章

(34) David Silver et al., "Mastering the game of Go without human knowledge," *Nature*, Vol.550, 2017.10.19, pp.354-359.

(35) 画像の中の物体を認識するなどの単純なタスクであれば単一のAI技術でも実現可能であるが、IBM社の「ワトソン」、ディープマインド社の囲碁AIのように複雑なタスクを行う場合には、複数のAI技術を組み合わせることが多い。

(36) 産業技術総合研究所人工知能研究センター (Artificial Intelligence Research Center: AIRC) で実施している「人間と相互理解できる次世代人工知能技術の研究開発」では、明示的ではない大量のデータから人間が理解できる知識を得られるAIの研究開発を進めている。「NEDO委託事業「次世代人工知能・ロボット中核技術開発/次世代人工知能技術分野/人間と相互理解できる次世代人工知能技術の研究開発」」産業技術総合研究所人工知能研究センターウェブサイト (<http://www.airc.aist.go.jp/nedoproject/index.html>)

(37) ヘルスケアのように、科学的根拠に基づく説明が求められる分野では、深層学習の適用には懐疑的な見方がある。人工知能学会編 前掲注(3), pp.1405-1406. (中嶋宏「ヘルスケア機器へのAI応用」)

(38) 理化学研究所の革新知能統合研究センター (Center for Advanced Intelligence Project: AIP) では、少ないデータからの高精度学習が可能となる新たなアルゴリズムなどの基礎研究・基盤技術の研究を行っている。人工知能技術戦略会議「人工知能技術戦略」2017.3.31, p.2. 新エネルギー・産業技術総合開発機構ウェブサイト (<http://www.nedo.go.jp/content/100862413.pdf>)

現在のAI技術は、幾つかの課題は残されているものの、知識処理・機械学習などの技術を含めた要素技術が成熟しつつあり、要素技術を相補的に利用することで高度なAIが実現できるようになっている。今後は、それらの要素技術を統合するためのアーキテクチャ（コンピュータシステムの構成方式）についても考えていく必要があるだろう。

執筆：国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系 准教授 市瀬 龍太郎
いちせ りゅうたろう

II 自然言語処理

人間が日常的に使う言語のことを、プログラミング言語のような人工言語に対比して「自然言語」と呼ぶ。本章では、2018年2月現在における自然言語処理技術を取り巻く社会的背景、国内外の状況、応用領域と今後の課題について述べる。

1 注目されるに至った社会的背景

1990年代後半にウェブ検索が普及したことによって、自然言語によって書かれた大規模なデータを処理し、検索するアプリケーションの有用性が広く認知されるようになった。ウェブ検索は、単語を入力すると該当するウェブページが出力されるシステムである。これは、一致する単語を探すこと（パターンマッチ）による全文検索の延長線上にあり、入力された単語に対する深い理解は必要ないと考えられていた。しかし、2011年にIBM社のAIシステム「ワトソン（Watson）」が、入力された文章に対し適切な知識を回答する質問応答タスクにおいて人間のクイズチャンピオンを上回る性能を示した⁽³⁹⁾ことが話題となり、分野を限定すれば人間に匹敵する言語理解能力を持つと認識されるようになった。⁽⁴⁰⁾

2012年以降、深層学習を中心とした技術革新が自然言語処理にも持ち込まれたことにより、2014年から2015年にかけて同分野の研究は大きく転換し、それ以降、深層学習を用いた手法の研究開発が盛んになっている。深層学習を導入した自然言語処理では、出力されるテキストが人間の書いたものと見分けがつかないほど流ちょうになっている。深層学習は、機械翻訳、対話、文書要約など言語生成と呼ばれるタスクで劇的な性能向上を実現し、技術的なブレイクスルーをもたらしている。⁽⁴¹⁾

2 技術動向

自然言語処理について最先端の研究開発が行われているのは米国である。特にベイエリアを中心とする西海岸、そしてニューヨークを中心とする東海岸に深層学習を用いた自然言語処理の研究開発を行う企業・大学・研究機関が密集している。米国における研究開発の特徴は、グーグルやフェイスブックに代表されるようなIT企業が自然言語処理開発の主導権を握っていることである。また、情報抽出や機械翻訳の研究は、商務省傘下の国立標準技術研究所

(39) 「クイズ番組に挑戦したIBM Watson」IBMウェブサイト〈<https://www.ibm.com/watson/jp-ja/quiz/index.html>〉

(40) 小町守監修，奥野陽ほか著『自然言語処理の基本と技術』翔泳社，2016，pp.14-25.

(41) 坪井祐太ほか『深層学習による自然言語処理』（機械学習プロフェッショナルシリーズ）講談社，2017，pp.122-158.

(National Institute of Standards and Technology: NIST) が主導した ACE (Automatic Content Extraction) に始まり、その後、国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) の GALE (Global Autonomous Language Exploitation)、TIDES (Translingual Information Detection, Extraction and Summarization)、BOLT (Broad Operational Language Translation) までのプロジェクト等を通じて、巨額の国防費が投入されており⁽⁴²⁾、大学においては軍事技術の民生転用も盛んである。例えば、DARPA の上記のプロジェクトで開発された機械翻訳の技術を核としてランゲージ・ウィーバー (Language Weaver) 社⁽⁴³⁾ を興した 2 名の研究者は、南カリフォルニア大学の教員であった。

中国は、国家主導型の研究開発を行っており、2016 年には清華大学、ハルビン工業大学を筆頭とする大学や、中国科学院のような研究機関における AI 関係の技術開発に、以後 3 年間で 1000 億元 (約 1.7 兆円⁽⁴⁴⁾) を投じると報じられた⁽⁴⁵⁾。また、IT 企業による自然言語処理の研究開発も盛んで、テンセント (騰訊) 社やバイドゥ (百度) 社はそれぞれ米国に研究開発拠点をもち、世界最先端の研究成果を数多く発表しており、自然言語処理における国際コミュニティでの存在感を増している。

一方、日本における自然言語処理は企業を中心に発展してきたが、この 10 年で劇的に環境が変わりつつある。1990 年代までは製造業による開発が主流で、バブル崩壊とともに自然言語処理の研究開発が一時下火になったが、2000 年代に入ってインターネットの普及とともにウェブ関連企業における需要が高まった。深層学習の登場以降は、大学発の AI 開発ベンチャーであるプリファード・ネットワークス社やパークシャ・テクノロジー (PKSHA Technology) 社などが活躍しており、これらのベンチャーには、大学や大企業から人材が流入している。他方、政府は、産業技術総合研究所 (人工知能研究センター)、情報通信研究機構 (ユニバーサルコミュニケーション研究所)、理化学研究所 (革新知能統合研究センター) 等が実施する AI 研究に 2016 (平成 28) 年度から 10 年間で約 1000 億円を投じることが報じられている。⁽⁴⁶⁾

3 実社会での応用

自然言語処理技術は、既に日本語入力、ウェブ検索、迷惑メールの判定など様々な場面で活用され、情報化社会を支える技術の一つとなっているが、今後 10 年のうちに飛躍的な発展を遂げると予想されているのは言語生成の分野である。具体的には、機械翻訳・対話・文書要約といったテキストを出力するアプリケーションである。これらのアプリケーションでは深層学習の登場により流ちょうな言語の出力が得られるようになったため、これまで人間が担っていた役割の一部が自動化されると見られている。

深層学習を用いた機械翻訳は、出力が流ちょうである反面、原文の意図を正しく反映していないことがあり、厳密には人間によるチェックが必要不可欠である。例えば、文芸書の翻訳の

(42) “Past Projects.” Linguistic Data Consortium Website <<https://www ldc.upenn.edu/collaborations/past-projects>>; “Broad Operational Language Translation (BOLT).” DARPA Website <<https://www.darpa.mil/program/broad-operational-language-translation>>; 科学技術振興機構研究開発戦略センターシステム・情報科学技術ユニット『研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2017 年)』科学技術振興機構研究開発戦略センター, 2017, p.231. <<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/FR/CRDS-FY2016-FR-04.pdf>>

(43) 2010 年に翻訳における世界トップシェアの SDL に買収された。

(44) 1 元を 17 円として換算した (平成 29 年 12 月分報告省令レート)。

(45) “China unveils three-year program for artificial intelligence growth,” *Chinadaily*, 2016.5.24. <http://www.chinadaily.com.cn/business/tech/2016-05/24/content_25442308.htm>

(46) 「人工知能で戦略組織 3 省連携、企業と研究加速」『日本経済新聞』2016.2.27, 夕刊, p.1.

ように内容の深い理解が必要な翻訳は機械翻訳によって代替できない。しかし、翻訳市場の大部分を占める技術文献や医学文献のような産業翻訳では、そこまでの品質は求められておらず、機械翻訳の導入が大幅に進むと予想されている。将来的に、人間が全ての翻訳を担う必要があるのは一部の分野にとどまるであろう。⁽⁴⁷⁾

現在、大きく注目されているもう一つの用途は対話である⁽⁴⁸⁾。フィンテック（ITを駆使した金融サービス）、リーガルテック（ITを駆使した法律関連サービス）、電子商取引などの分野では、これまで専門知識を持った人間が顧客のサポート業務を行ってきた。こうした分野では、サポート業務の一部で、自動的に顧客への応答を生成するシステムが普及すると考えられる。そのようなシステムは、米国を始めとする西欧諸国では既に普及しているが、日本ではサポートの品質を重視するために導入が進んでいない。しかし、今後は日本でも情報通信機器の使用に抵抗感が少ない世代の割合が増し、こうした世代が人間による応答との品質の差を理解した上でこのようなシステムを使いこなすようになり、機械による代替が進んでいくと予想される。

そのほか、自然言語処理の適用が有望な分野としては、障害者支援が挙げられる。これまでも、音声認識や音声合成の技術は研究されてきており、MacやiPhoneにも搭載されて聴覚障害や発話障害がある人を支援しているが、2015年以降は言語と画像の融合領域が盛んに研究されており、画像や動画にキャプション（説明文）を付ける手法が提案されている。画像や動画へのキャプション生成と音声合成を組み合わせることで、視覚障害者が画像の内容を理解することができるようになる。こうした画像・音声・言語処理技術の組合せは、誰でも情報にアクセスできる世界の実現に貢献し得る。

4 今後の課題

言語生成の研究が盛んになるにつれ、生成された文章の著作権やプライバシーの問題が顕在化する可能性があり、どのように対応するかが課題となっている⁽⁴⁹⁾。倫理的な問題としては、例えば医療情報処理における個人情報の取扱い、ネット上から自分の過去の情報を削除できる「忘れられる権利」との関係、ジェンダーや少数民族などマイノリティに対するバイアス⁽⁵⁰⁾といった問題が議論されている。日本では人工知能学会が2014（平成26）年に倫理委員会を発足させている⁽⁵¹⁾。

技術面では、深層学習以前は言語生成のルールや参照辞書が、人間が可読な形で記述されていたため、不適切な出力を生成しないようにすることはある程度可能であったが、深層学習を用いる場合、出力の制御は技術的に難しくなる。今後の研究によりこれが解決されるまでは、高精度な言語生成の利便性とリスクとを十分認識した上で利用することが求められる。

執筆：首都大学東京大学院システムデザイン研究科 准教授 小町 守 こまち まもる

(47) 坪井祐太ほか 前掲注(41)

(48) 小町守監修・奥野陽ほか著 前掲注(40), pp.212-236.

(49) 奥邨弘司「人工知能が生み出したコンテンツと著作権—著作物性を中心に—」『パテント』Vol.70 No.2, 2017, pp.10-19. (<https://system.jpaa.or.jp/patent/viewPdf/2742>)

(50) 機械学習において学習の対象となったデータの中にマイノリティに関して倫理的に問題のある表現が多数含まれていると、それを学習したAIがそうした表現を使ってしまうという問題。

(51) 松尾豊ほか「人工知能学会倫理委員会の取組み」『人工知能』Vol.30 No.3, 2015.5, pp.358-364.

III 画像獲得・認識

1 画像獲得・認識の概略

近年の AI 技術の進展は産業界を中心に大きな変革をもたらしており、画像認識・処理分野にも大きな影響を与えている。技術的な背景としては、高精度なカメラ、多様なカメラの低廉化・小型化に加え、深層学習などの新たな機械学習・認識技術が開発されたことがある。社会的な背景としては、スマートフォン、クラウドコンピューティング (cloud computing)⁽⁵²⁾、ソーシャルネットワークサービス (Social Networking Service: SNS) などの普及により画像が手軽に共有され、その結果として画像認識の対象やニーズが拡大したことがある。つまり、誰もが簡単に画像を取得することができ、それが SNS などで共有されることが、画像認識、例えば人や物体の認識、人物同定などのニーズを高めたと言える。本章では、画像を取得する「目」の役割を果たすイメージセンサと、その画像を解釈する「脳」の役割を果たす画像認識・処理の進展について述べる。

2 イメージセンサの進展

イメージセンサとは、外界の光をデジタルに変換する素子であり、日本はその発展に大きく貢献しており、日本のメーカーが開発したイメージセンサは現在も競争力を持っている。イメージセンサは人の「目」に相当する部分であるが、人には見えない情報も取り入れることで、様々な用途に適用することが可能になった。これらは従来、工業・軍事等の専門用途に用いられるものだったが、大量生産により低廉化し、高機能なイメージセンサが一般消費者向けの機器にも導入されるようになってきている。

(1) カラー画像センサ

カラー画像センサは、人の目と同様に赤・緑・青 (RGB) の光をとらえるものであり、この 10 年間で約 5～7 倍の高解像度化が進み、スマートフォンでも 1000 万画素以上のものが使われている⁽⁵³⁾。これ以上の高解像度化は、記憶容量の問題やレンズの性能 (描写力) の限界がある。その代替として開発が進んでいるのが、より暗い又は明るい領域を撮影できるハイ・ダイナミック・レンジ (High Dynamic Range: HDR) 対応素子である。

(2) 多スペクトル画像センサ (赤外センサ)

赤外光をとらえる赤外センサなどをカラー画像センサの代わりに用いると、光の反射などの影響が抑えられ、顔認識の性能が向上する、目の光彩を用いる認証が行えるようになるなどのメリットがあり、普及が進んでいる⁽⁵⁴⁾。このセンサは、従来は暗視装置など用途が限られていたが、顔認証などが普及する中でパーソナルコンピュータ (PC) やスマートフォンにも内蔵

(52) 「VII IoT」の「1 (2) インフラ環境の充実」を参照。

(53) 例えば、iPhone の背面に搭載されたセンサの画素数は、初代 (2007 年 6 月発売) は 200 万画素であったが、最新機種 (2017 年 11 月発売) は 1200 万画素である。“Guides and Sample Code: iOS Device Compatibility Reference: Cameras.” Apple Developer Website <<https://developer.apple.com/library/content/documentation/DeviceInformation/Reference/iOSDeviceCompatibility/Cameras/Cameras.html>>

(54) 「虹彩 / 顔認証光センサ市場、2017-2025 年に CAGR24% 成長」2017.3.13. LEDs Magazine Japan ウェブサイト <<http://ex-press.jp/ledj/ledj-news/ledj-biz-market/17594/>>

されるようになっている。

(3) 距離画像センサ

距離画像センサはカメラ周辺の奥行情報を計測する機器であり、これを利用すると画像認識や自動運転の性能を向上させることができる。2009年にマイクロソフトが「キネクト (Kinect)」と呼ばれる距離画像センサを搭載したゲーム機を発売したことで、急速に低廉化し、普及が進んでいる⁽⁵⁵⁾。また、自動ブレーキなど運転支援機能を持つ自動車では、車から物体までの距離を知るために距離画像センサが不可欠である。

距離画像センサは、その計測方式によって幾つかの種類に分けられる。2つの画像センサを使うものや、1つの画像センサと赤外光の照射を組み合わせたもの、レーザーの照射とその反射を計測するものなどがあり、それぞれに計測距離や利用可能な環境（明暗・天候）などの長所・短所が存在する。今後は、これら複数のセンサを組み合わせる方式も検討されている⁽⁵⁶⁾。

(4) ライト・フィールドカメラ

ライト・フィールドカメラ (Light Field Camera) は、光の明暗や色彩だけでなく、光の入射角度の情報も記録することで、三次元的な情報も含めて記録するカメラである。イメージセンサの前面にマイクロレンズアレイ (微小なレンズを多数並べたもの) を配し、光線の明暗だけでなく、光線の入射方向に関する情報を記録する。

明暗や色彩に関する二次元の情報のみを記録する従来のカメラと異なり、撮影後に画像の焦点位置 (ピント) を前後に移動させることや、被写界深度 (ピントが合っている範囲) を変えることができるなど、新たな可能性を秘めたカメラである。解像度の不足や多くの光量を必要とするなど難点もあるが、米ライトロ (Lytro) 社が一般向けに発売するなど実用化が始まっている⁽⁵⁷⁾。

(5) 全周カメラ

近年、バーチャル・リアリティ (Virtual Reality: VR) 技術が普及するに当たり注目を集めているのが、360度全方向を撮影できる全周カメラである。一般消費者向けの機器も国内外で発売されている⁽⁵⁸⁾。全周カメラは、複数の素子の組合せや広角が撮影できる魚眼レンズの利用といった従前の技術を応用して開発されたものであるが、従来のカメラとは異なる映像表現ができることやVRコンテンツ⁽⁵⁹⁾との親和性が高いことから、世界的に需要が高まっている⁽⁶⁰⁾。

⁽⁵⁵⁾ 「特許分析で分かった、距離画像で最強の企業 “量” で圧倒、ダントツに強い Microsoft 社」『日経エレクトロニクス』No.1135, 2014.5.26, pp.49-57.

⁽⁵⁶⁾ 「自動運転に最適なコンポーネントの組み合わせは?…センサー技術開発説明会」2016.8.10. Response ウェブサイト <<https://response.jp/article/2016/08/10/279956.html>>

⁽⁵⁷⁾ Lytro ウェブサイト <<https://support.lytro.com/hc/ja/>>

⁽⁵⁸⁾ RICHO THETA ウェブサイト <<https://theta360.com/ja/>> ; “SP360 Action Camera.” Kodak デジタルカメラ Website <<https://kodakpixpro.com/AsiaOceania/jp/cameras/actioncam/sp360.php>>

⁽⁵⁹⁾ 例えば、凸版印刷は、安土城や日光東照宮の陽明門などのVRコンテンツを製作している。「主なトッパンVR作品」トッパン・VR デジタルアーカイブウェブサイト <<http://www.toppan-vr.jp/bunka/action.shtml>>; 「次世代技術特集 ARも進化、五感刺激、凸版、観光地を体験」『日経産業新聞』2017.11.27, p.10.

⁽⁶⁰⁾ 「360度カメラ 競争白熱」『日経産業新聞』2016.10.31, p.7.

(6) ウェアラブルカメラ

カメラが小型化、低廉化したことにより、日常の行動を記録するなどの目的で、身に着けて使用するウェアラブルカメラが登場している。ウェアラブルカメラのうち、人の視線と同じ映像を記録する一人称視点センサは、スポーツ分野等のコンテンツの製作、また警察における情報収集や犯罪者の発見などでの利用も期待されている⁽⁶¹⁾。また、眼鏡に取り付け、ウィンクに同期してシャッターを作動できるようにしたカメラも登場している⁽⁶²⁾。

3 画像認識研究の進展

画像認識の研究はここ10年、特に深層学習の研究が進展したここ5年ほどで、急速な発展を遂げている。以下では、画像認識の様々な応用分野における研究開発動向を説明する。

(1) 一般物体認識

一般物体認識とは、撮影された画像から人や物体がどの領域に存在するかを検出し、認識する技術である。2007年頃、画像の局所的な特徴を把握し、その構成を基に画像を識別する「Bag of Features」という手法⁽⁶³⁾が導入されたことにより性能が高まった。また、この手法において学習のために必要となる画像サンプルのデータ群が整備されたことにより⁽⁶⁴⁾、世界的な開発競争が行われてきた。

さらに、2012年から画像認識に「畳み込みニューラルネットワーク」⁽⁶⁵⁾という深層学習の技術が導入されたことにより⁽⁶⁶⁾、認識の精度が格段に向上した。この手法は、物体の識別、例えば動物や植物の種の識別などにも適用されており、開発競争が続いている。

(2) 顔の認識

顔は多種多様であるが部分的には共通する特徴がある。これに着目した高速顔検出手法⁽⁶⁷⁾が2000年に考案されたことにより、デジタルカメラ等に顔を検出する機能が組み込まれるようになった。

近年、この分野にも深層学習の技術が導入され、顔の検出だけでなく顔から性別・年齢・表情などの様々な情報も検出できるようになっている。さらに、顔から個人を特定する顔認証技

(61) 「パナソニック 警察向け ウェアラブルカメラを世界展開 テロ対応にらむ」『日本経済新聞』2016.1.5, p.12.

(62) 例えば、BlinCam Website <<https://www.blincam.co/>>

(63) Gabriella Csurka et al., "Visual categorization with bags of keypoints," *Proceeding of Workshop on Statistical Learning in Computer Vision, 8th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2004. <http://www.europe.naverlabs.com/content/download/23625/171397/version/1/file/2004_010.pdf>

(64) The PASCAL Visual Object Classes Website <<http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/>> なお、EUからの資金提供を受けて実施された。"Pattern Analysis, Statistical Modelling and Computational Learning 2," European Commission CORDIS Website <http://cordis.europa.eu/project/rcn/85729_en.html>

(65) 識別部位の位置にかかわらず画像認識できるように画像を分割して取り込んだデータを統合（畳み込み）して処理する方法。

(66) Alex Krizhevsky et al., "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks," *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vol.1, 2012, pp.1097-1105. <<https://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>>

(67) 画像の中の顔ではない部分を、単純な計算によって高速に顔ではないと判断することで検出速度を高めた。Paul Viola and Michael J. Jones, "Robust Real-Time Face Detection," *International Journal of Computer Vision*, Vol.57 No.2, 2004.5, pp.137-154.

術も開発され、出入国管理や不審人物特定などへの適用が始まっている⁽⁶⁸⁾。なお、顔から個人を特定する技術は様々な用途への適用が期待されるが、その一方で、後述するようにプライバシー等の問題も含んでいる。

(3) 医療への応用

医療分野では、X線画像やCT、MRIなどの画像からの病変特定を医師が行っているが、これに画像認識の技術を適用する研究が進められている⁽⁶⁹⁾。例えば、深層学習の技術を用いて異常のある部位の候補を検出し、それを医師が最終判断するといった用途が想定されている。

4 今後の課題

画像認識は近年急速な発展を遂げているが、同時に社会的・倫理的な問題も生じており、その普及に影響を及ぼす可能性がある。

(1) 深層学習データの適用

深層学習は画像認識に大きな進展をもたらしたが、一方で技術的な限界や社会的な問題も引き起こしている。深層学習を用いた画像認識では、より多くの画像サンプルから学習を行うことで性能を向上させることができるが、利用できる画像サンプルの量には限界がある。一部のネット企業がインターネットから個人の画像データを取り出して学習に用いる例も出ている。しかし、個人が作成・公開したデータを深層学習に利用することに対しては、著作権やプライバシーといった法的課題や倫理的な課題が指摘されている⁽⁷⁰⁾。

(2) 画像認識可能なカメラの使用

カメラが様々な機器に搭載され、画像認識の精度も向上していくにつれて、プライバシーの問題も生じている。個人の特が可能な画像は個人情報に該当するため、「個人情報の保護に関する法律」(平成15年法律第57号)の遵守や、使用の事前告知などの配慮が求められている⁽⁷¹⁾。

プライバシーや倫理面で問題となった具体例としては次のようなものがある。グーグルが開発した眼鏡型の情報端末「グーグルグラス (Google Glass)」⁽⁷²⁾には小型カメラが内蔵されている。同社は、プライバシー保護の観点から、個人の特が可能な顔認証技術を当面使用しないことを決めたが⁽⁷³⁾、それでも隠し撮りなどの懸念から個人向け販売が中止に追い込まれた⁽⁷⁴⁾。

(68) 「顔認証ソフト精度高く パナソニック 深層学習生かす」『日経産業新聞』2018.2.22, p.4; 「顔認証、審査10秒で 法務省、羽田空港で公開、日本人の出入国効率化」『日本経済新聞』2017.10.14, p.38; 「東京マラソン 2020年見据え 警備は 暑さ対策は」『産経新聞』2018.2.26, p.30.

(69) 「画像診断におけるAI活用の現状と展望」2017.6.29. Medtec Japan ウェブサイト <<http://www.medtecjapan.com/ja/news/2017/06/29/1936>>

(70) 浅川直輝 「ネットで集めたデータはAI学習に使えるか?」2017.6.22. 日経クロステックウェブサイト <<http://tech.nikkeibp.co.jp/it/atcl/column/17/051800199/062000008/>>

(71) IoT推進コンソーシアムほか「カメラ画像利活用ガイドブック」2017.1, pp.16-20. 経済産業省ウェブサイト <<http://www.meti.go.jp/press/2016/01/20170131002/20170131002-1.pdf>>

(72) Thad Starner, "Project Glass: An Extension of the Self," *IEEE Pervasive Computing*, Vol.12 No.2, 2013.4, pp.14-16.

(73) 「Google Glassの顔認識アプリは当面認証しないとGoogleが表明」2013.6.1. ITmedia NEWS ウェブサイト <<http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1306/01/news012.html>>

(74) 「プライバシー グーグル阻む 眼鏡型端末、個人向け販売中止」『日本経済新聞』2015.1.17, p.13.

このほか、深層学習を用いた画像認識による人種差別の問題も生じている⁽⁷⁵⁾。

(3) 医療分野への適用をめぐる課題

医療分野における画像認識は、上述したような病変特定の支援に加え、ウェアラブルカメラを活用するなどにより、患者とのコミュニケーション中の画像を撮影・分析し、医療（例えば精神科領域）に応用することなどが期待されている⁽⁷⁶⁾。

ただし、医療分野に適用する場合、画像認識のエラーによる病変の見落としや誤診断やプライバシーなどへの懸念が生じることが想定され、医療分野において画像認識技術が普及するには、こうした問題への対応が求められるであろう。

執筆：京都大学大学院情報学研究科 准教授 なかざわ あつし 中澤 篤志

IV 音声インタフェース

1 注目されるに至った社会的背景

音声インタフェースとは、音声を使って人とコンピュータがやり取りをするシステムである。一般的には、コンピュータへの入力に音声を用いる場合（人の音声をシステムが処理する場合）と、システムからの出力に音声を用いる場合（システムが出力した音声を人が聞く場合）の両方が含まれるが、ここでは特に前者、つまり音声認識を扱うものについて述べる。

(1) 音声認識技術の進歩

音声認識とは、人の話す音声信号を入力として、それに対応する文字列や単語列を出力する処理である。音声認識の研究は古くから行われており、日本でも1960年前後からパターン認識⁽⁷⁷⁾の一分野として研究が続けられてきた⁽⁷⁸⁾。

1990年代までは研究室内の実験にとどまっていたが、PCの普及の流れを受け、2000年前後にIBM社が一般ユーザ向けの音声認識ソフトウェア「ビアボイス（ViaVoice）」を開発し、日本語版も発売された⁽⁷⁹⁾。人の音声を認識できるということで話題になり、テレビCMにも登場したが、広く使われるには至らなかった。その理由として、使用の前に話者ごとに数百文程度の音声を録音するエンロールと呼ばれる作業が必要であったこと⁽⁸⁰⁾や、認識できる語彙のサイズや性能に限界があったことが挙げられ、いずれも当時の技術が実用に耐えるほどには発

(75) Jana Kasperkevic, “Google says sorry for racist auto-tag in photo app,” 2015.7.1. Guardian Website <<https://www.theguardian.com/technology/2015/jul/01/google-sorry-racist-auto-tag-photo-app>>; 「「ゴリラ」と誤認識 グーグル謝罪」『朝日新聞』2015.7.3, p.11.

(76) 「特集 コミュニケーションを処方する」『総合診療』Vol.27 No.5, 2017.5, pp.568-623.

(77) 文字や音声などの入力パターンが、事前に定義したどのクラスに相当するの（例えば線画の集合が何という文字を表すのか）を認識すること。

(78) Toshiyuki Sakai and Shuji Doshita, “An Automatic Recognition System of Speech Sounds,” *Studia phonologica*, Vol.2, 1962, pp.83-95. <<http://hdl.handle.net/2433/52632>>

(79) 「ViaVoice ミレニアム音声認識ソフトウェア最新版 認識精度と使いやすさを向上」1999.9.28. IBM ウェブサイト <<http://www-06.ibm.com/jp/press/1999/09287.html>>

(80) 「日本 IBM、認識エラーを減らした「ViaVoice 8」を発表」2000.9.21. ITmedia ウェブサイト <<http://www.itmedia.co.jp/news/0009/21/viavoice.html>>

達していなかったことによる。また、当時は持ち運びのしにくいデスクトップ型 PC が主流であり、これを使って音声認識を行うというシチュエーションは限定的であったことも一因であろう。

(2) 一般ユーザ向けアプリの登場

2000年代後半から2010年代にかけて、通信速度の向上などを受け、クラウドコンピューティング⁽⁸¹⁾に基づくクラウド型音声認識が登場したことにより、開発のパラダイムが大きく変わった⁽⁸²⁾。それまではユーザの手元にあるコンピュータ上で音声認識処理を行っていたが、クラウド型では音声データをサーバに送ることによりサーバ上で音声認識を行えるようになった。これによる運用上のメリットは非常に大きい。ユーザは既存の音声端末(例えばスマートフォン)から音声認識を気軽に使うことができる。また、音声認識に使われる辞書もサーバ側にあるため、システム開発者が随時アップデート可能である。更には音声データがサーバに送られるためデータ収集が極めて容易となり、収集したデータを機械学習による性能向上に使うことができる。

上記のパラダイムシフトにより、スマートフォンなどで使える一般ユーザ向けの音声認識アプリが登場した。代表的なものとして、グーグル社の「ボイスサーチ (Voice Search)」⁽⁸³⁾、アップル社の「シリ (Siri)」⁽⁸⁴⁾がある。これらのアプリは、単に音声認識を行うだけではなく、音声認識結果を用いてウェブを検索したり何らかの応答を行ったりすることができる。また、これらのアプリはいずれも無料であり、アプリ開発の目的は販売ではなく、企業の技術力の誇示、音声を含む顧客データの収集、自社の他のサービスへの誘導など長期的なビジョンに基づく先行投資と考えられている⁽⁸⁵⁾。なお、グーグル社は、ボイスサーチ以前から「GOOG-411」という電話番号案内サービス⁽⁸⁶⁾を通じてデータ収集を続けていた。

ここ数年(2010年代後半から)では、インターネットに接続して音声操作で音楽・ニュースを聴くことや家電の操作などを可能にしたスマートスピーカーと呼ばれる家庭用の商品が登場している。日本では、2017年10月にグーグル社の「グーグルホーム (Google Home)」⁽⁸⁷⁾とライン社の「クローバウェーブ (Clova WAVE)」⁽⁸⁸⁾が、2017年11月にはアマゾン社の「アマゾンエコー (Amazon Echo)」⁽⁸⁹⁾の販売が開始された。

(81) 「Ⅶ IoT」の「1 (2) インフラ環境の充実」を参照。

(82) 「市場動向編 クラウドの利用で飛躍 用途はスマホ以外にも拡大」『日経エレクトロニクス』No.1098, 2012.12.24, pp.26-33.

(83) 2009年に日本語版が公開された。「「Google 音声検索」日本語版開始、iPhoneとAndroidから利用可能」2009.12.7. InternetWatch ウェブサイト〈<https://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/333996.html>〉

(84) 2012年に日本語版が公開された。「アップル、iOS 5.1 アップデートを公開、iPhone 4SでSiriが日本語に対応」2012.3.8. ITpro ウェブサイト〈<http://itpro.nikkeibp.co.jp/pc/article/news/20120308/1043362/>〉

(85) 小林雅一「クラウドからAIへーアップル、グーグル、フェイスブックの次なる主戦場ー」(朝日新書)朝日新聞出版, 2013, pp.115-118.

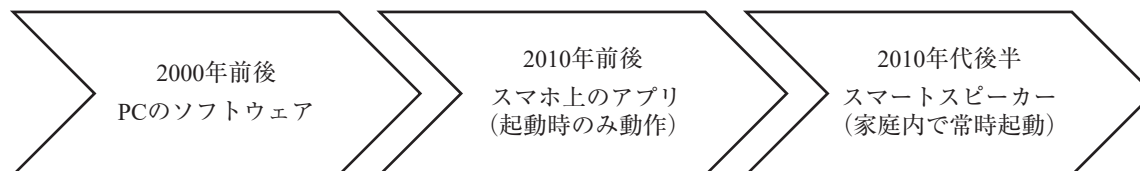
(86) 「Google、無料番号案内の411サービス開始」2007.4.7 TechCrunch Japan ウェブサイト〈<http://jp.techcrunch.com/2007/04/07/google-launches-free-411-business/>〉なお、同サービスは2010年11月に終了した。

(87) 「Google Home」Google ウェブサイト〈https://store.google.com/product/google_home〉

(88) 「Clova WAVE」LINE ウェブサイト〈<https://clova.line.me/>〉

(89) 「「エコー」1万1980円 アマゾン AIスピーカー発売」『日経産業新聞』2017.11.9, p.2.

図1 音声インタフェースの利用状況の変化



(出典) 筆者作成。

2 技術動向

音声認識で使われる技術は、1990年には統計的手法に基づく機械学習が主流であったが、ここ数年は深層学習を用いた技術が席卷（せっけん）している⁽⁹⁰⁾。音声認識の分野では、音声認識率（認識結果に占める正解の割合）という明確な評価尺度があり、共通の音声データベースも整備されていることから、国内外を問わず、優れた手法が出現するとそれが一気に広まるといった傾向がある。端的に言えば、音声認識の性能は、学習データ量が多いほど、またそのデータが実使用に近い環境（つまり実際のユーザ）から得られたデータ（リアルなデータ）であるほど高くなる。このため、「ユーザが使う⇒データが集まる⇒性能が上がる⇒ユーザが使う」という正のスパイラルが回り始めると性能向上が加速する。

深層学習には、統計的手法よりもはるかに大きなデータ量や計算リソースが必要とされることから、音声認識の研究開発は、大規模データや計算リソースを持った一部企業（グーグル、アマゾン、マイクロソフトなど）に事実上絞られつつある。日本では、大学や企業（日本電信電話（NTT）、日本IBM、日立製作所、東芝、NECなど）の研究所において音声認識の研究が行われてきたが、音声認識の精度よりも、むしろその応用分野の研究にシフトしつつあるように思われる。例えば、応用分野である音声インタフェースでは、NTTドコモの「しゃべってコンシェル」⁽⁹¹⁾やヤフーの「音声アシスト」⁽⁹²⁾などスマートフォンに話しかけるだけで電話発信やアラーム設定などができるアプリが提供されているほか、同様のサービスを提供する多数のベンチャー企業（イナゴ⁽⁹³⁾など）が存在する。

米国では、アマゾンが2016年に「アレキサプライズ（Alexa Prize）」⁽⁹⁴⁾という開発コンテストを開催するなど、リアルなデータを持つ企業がそれを提供して、各国の大学などの研究機関を巻き込んで技術開発を進めるといった動きも見られる。これも短期的な投資回収を目指した動きではなく、長期的なビジョンに基づく先行投資と考えられる。また、技術的に難易度の高い課題に取り組む研究ではリアルなデータへの需要は高いが、大学などの研究機関がリアルなデータを大量に収集することは困難であるため、この取組は産学連携の理想的な形態であるとも言えよう。一方、日本ではこのような長期的なビジョンに基づく取組はあまり見られない。

インタフェースとは少し離れるが、業務用の音声認識技術は、現状でもかなり利用が進んでいる。我が国の衆議院では、国会会議録を作成するため、京都大学が開発した音声認識技術が

(90) 河原達也「音声認識技術の展開」『信学技報』PRMU2015-111, 2015.12, pp.111-116. <<http://sap.ist.i.kyoto-u.ac.jp/members/kawahara/paper/KAW-prmu15-12.pdf>>等を参照。

(91) 「しゃべってコンシェル」NTTドコモウェブサイト <https://www.nttdocomo.co.jp/service/shabette_concier/>

(92) 「音声アシスト」Yahoo! JAPANウェブサイト <<https://v-assist.yahoo.co.jp/>>

(93) イナゴウェブサイト <<http://www.inago.com/ja/>>

(94) アマゾン社の音声インタフェース「アレキサ（Alexa）」上で使える対話アプリの開発を競うコンテスト。大学生が対象で賞金総額は250万ドル（約2億8千万円。平成29年12月分報告省令レートに基づき1ドルを113円として換算）。“The Alexa Prize.” Amazon.com Website <<https://developer.amazon.com/alexaprize>>

既に導入されている⁽⁹⁵⁾。またコールセンターでの録音音声に不適切な単語が含まれていないかのチェックや⁽⁹⁶⁾、レントゲン写真を読影（検査画像から診療上の所見を得ること）する際の口述の書き起こし⁽⁹⁷⁾などの応用がなされている。後者は、暗室で読影するため入力にPCを使いにくい状況であり、一方で部屋が静かであることから音声認識の性能が劣化せず、周囲の迷惑にもならないという、ニーズと利用可能条件がうまくマッチした一例である。こうした技術の開発や販売は、米国ではニュアンス（Nuance）社⁽⁹⁸⁾が、日本ではアドバンスト・メディア社⁽⁹⁹⁾やフュートレック社⁽¹⁰⁰⁾などの企業が知られている。

3 実社会での応用

(1) カーナビゲーション

これまで日本で注力されてきた応用分野として、音声操作によるカーナビゲーション（カーナビ）が挙げられる。運転時には前方注視が必要であることから、音声操作へのニーズは高い⁽¹⁰¹⁾。カーナビに音声認識機能が搭載され始めたのは1995年頃とされ⁽¹⁰²⁾、日本の自動車関連メーカーなどが研究開発を始めたが、自動車メーカー純正のカーナビの音声認識機能に対する評価は必ずしも高くない⁽¹⁰³⁾。この理由の一つとして、安全性が重視される自動車産業の「完璧でないものは出せない」という企業風土（高い要求水準）⁽¹⁰⁴⁾を背景に、クラウドを利用しないシステム（通信が確保できない場合でも稼働するシステム）として開発されてきたため、音声認識辞書や地図データのアップデートができず、ユーザからのデータ収集もできなかったことが考えられる。その一方で、スマートフォンで稼働するカーナビアプリが普及しつつある⁽¹⁰⁵⁾。

(2) ロボット

日本では文化的に人型ロボットへの親和性が高く⁽¹⁰⁶⁾、音声対話ロボット「ペッパー（Pepper）」

(95) 「衆議院の新会議録作成システムにおける京都大学の音声認識技術の導入」2011.5.12. 京都大学ウェブサイト〈http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2011/110512_2.htm〉

(96) 「リアルタイムに顧客とオペレーターの通話内容をテキスト化し活用する「コンタクトセンター業務効率化支援サービス」を販売開始」2017.3.23. 日立製作所ウェブサイト〈<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2017/03/0323a.html>〉

(97) 「放射線科読影レポート向け AmiVoice Ex7 Rad および AmiVoice Ex7 RadClient」アドバンスト・メディアウェブサイト〈<http://medical.amivoice.com/product/rad.html>〉

(98) Nuance Communications Website 〈<https://www.nuance.com/>〉

(99) アドバンスト・メディアウェブサイト 〈<https://www.advanced-media.co.jp/>〉

(100) フュートレックウェブサイト 〈<http://www.fuetrek.co.jp/>〉

(101) ただし、後述するロボットと同様に、スマートフォンよりも車内の方が、音声認識を行う環境としての難易度は高い。例えば、スマートフォンではユーザの口に近い位置で話されることが多く雑音の混入は比較的少ないが、車内ではエンジン音、風切り音、車内の音楽などが混入するためである。

(102) 赤堀一郎「カーナビ音声認識の商品開発」『情報処理学会研究報告 音声言語情報処理』2005-SLP-058, 2005.10, p.31. 〈https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_uri&item_id=56972&file_id=1&file_no=1〉

(103) 調査会社 J.D. パワーによれば、音声操作を利用しているユーザの19%が不具合を感じており、音声操作を使用しているユーザの割合は29%（2016年）から26%（2017年）に低下している。「自動車メーカー純正のナビゲーションシステムの顧客満足度調査、レクサス、スバルが第一位 スマートフォン接続時の操作性、音声認識機能の性能改善が重要課題」2017.10.6, p.2. J.D. パワーウェブサイト 〈http://japan.jdpower.com/sites/default/files/17_jp_navi-oem_pr_j_fnl.pdf〉

(104) 例えば、自動車関連メーカーのある開発者は、音声認識の平均認識率が99%であったとしても、認識率が低い特定の話者にとってその商品は満足できるものとはならず、商品としては受け入れがたいと述べている。赤堀 前掲注(102), pp.31-32.

(105) 「無料のスマホナビアプリってどこまで頼れるの?人気2大ナビアプリをレビュー!」2015.1.28. 東洋ゴム工業ウェブサイト 〈<http://www.toyo-rubber.co.jp/ontheroad/drive/978/>〉; 野間恒毅「スマホでナビ 最新地図に渋滞情報、弱点はトンネル」『NIKKEI STYLE』2017.6.13. 〈<https://style.nikkei.com/article/DGXMZO17221990S7A600C1000000>〉

(106) 「ロボ・AIと未来 淡路でシンボ」『日本経済新聞』2017.8.9, p.9.

が市販されるなど、音声認識技術とロボット工学との融合である対話ロボットに対する期待は大きい。また、対話ロボットは、介護サービスなどへの応用も期待されている⁽¹⁰⁷⁾。少子化が進むこれからの日本で必要とされる技術である。

しかしながら、スマートフォンのように話者の口元で話す場合の音声認識と、ロボットから1メートル離れた場所から話す場合の音声認識（遠隔音声認識）では、技術的な難易度が大きく異なる。具体的には、部屋の残響や音の反射、周辺雑音の混入が問題となる。さらにロボット自体の動作によるモータ音や冷却ファンなどの動作音も無視できない。したがって、研究室レベルの対話ロボットはともかく、広くユーザに使われる対話ロボットの実現には更なる研究が必要である。

なお、上述した据置型のスマートスピーカーは、このような対話ロボットの実現へ向けた布石となる可能性がある。スマートスピーカーによって、一般ユーザが使用する環境での音データや、離れた場所からの音声を大量に収集することができるからである。ただし、スマートスピーカーがどの程度普及するかは未知数であり、対話ロボットへの応用に役立つデータを生み出せるかどうかはまだはっきりしない。

(3) 音声翻訳

機械翻訳と音声認識を組み合わせた音声翻訳も有望な応用分野である。定型的な文の音声翻訳は既に現状でも実現されているものの⁽¹⁰⁸⁾、文化を含むコンテキスト（文脈）を考慮した上での翻訳は人間でも難しく、「深層学習で精度が上がったからできるようになる」というものではないと思われる。このような翻訳を実現するためには、人間が言語をどのように使うかといった、言語学における語用論的な研究も含めた、地道な学術研究が必要となろう。

4 プライバシーの問題

常時起動型のスマートスピーカーでは、プライバシーの問題が起こり得る⁽¹⁰⁹⁾。スマートフォン上のアプリのように、ユーザが起動した際にのみ音声認識（つまり録音）が行われるのではなく、常時サービス提供者のサーバに音声アップロードされる可能性があるからである。一方、この問題に関しては、日本ではリスク面のみが強調されることで議論が進まずに開発や普及が遅れ、その間に外国由来のサービスが普及することも懸念される。

執筆：大阪大学産業科学研究所 教授 こまたに 駒谷 かずのり 和範

⁽¹⁰⁷⁾ 「介護現場での「コミュニケーションロボット」の活用可能性に関する大規模実証調査を実施—1000台規模のロボットを導入して、各種データ収集・解析を支援—」2016.3.17. 日本医療研究開発機構ウェブサイト〈https://www.amed.go.jp/news/release_20160317.html〉

⁽¹⁰⁸⁾ 「救急隊用音声翻訳アプリ「救急ボイストラ」が全国の消防本部へ!」2017.4.18. 情報通信研究機構ウェブサイト〈<https://www.nict.go.jp/info/topics/2017/04/170418-1.html>〉

⁽¹⁰⁹⁾ 「プライバシーが気になる、家族の会話に聞き耳を立てる AI スピーカー」2017.9.4. 日経クロステックウェブサイト〈<http://tech.nikkeibp.co.jp/it/atcl/watcher/14/334361/083100911/>〉

V ヒューマンエージェントインタラクション

1 注目されるに至った社会的な背景

(1) 基本的定義

ヒューマンエージェントインタラクション (Human-Agent Interaction: HAI) は、人間と人工物の相互作用を扱う研究分野であり、情報処理技術、工学的な機械制御技術、及び心理学応用技術を用いて人工物を擬人化し、人間同士のような円滑で温もりのあるやり取りを実現するための設計方法を開発するものである⁽¹¹⁰⁾。具体的には、人型ロボットに代表されるコミュニケーションロボットや仮想エージェント⁽¹¹¹⁾を取り扱う。

人間を代替するシステムには、頭脳の代替となる AI や、身体機能の代替となる材料・形状設計や機械制御がある。HAI の研究では、感情を含む人間らしさをもつ AI や、「心」の内部状態に伴う身振りや表情などの表現力と存在性のある身体を持ったシステムの実現を目指している。このように HAI は、人間らしさを感じさせる要素を科学的に分析し、工学的に合成した、AI を内包し外的相互作用を起こすための入れ物となる心理的・身体的インタフェースとも表せる。AI による非直感的な情報処理結果をユーザに分かりやすく伝えるに当たって、必要不可欠となる研究分野である⁽¹¹²⁾。

(2) 社会的背景

対話システムの技術は、1960年代から、人間とコンピュータの接点を扱うヒューマンインタフェースやヒューマンコンピュータインタラクションの分野において、テキスト対話⁽¹¹³⁾から音声対話⁽¹¹⁴⁾、さらに音声対話に身体性を付与した対面対話⁽¹¹⁵⁾へと発展してきた。中でも、1990年代～2000年代、ロボット制御技術の発展を背景に、様々な人型ロボットが現れた。例えば、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) が開発した「キスメット (kismet)」⁽¹¹⁶⁾は、人間の感情を認識するとともに自ら感情を表現することができ、身体性と社会性を併せ持つロボットである⁽¹¹⁷⁾。

このような、身体性、社会性を併せ持つ対話的相互作用システムを発展させることにより、システムは高度に擬人化され、人間に代わって情報を分かりやすく伝えることや、人間から親しまれる存在となることができるようになる⁽¹¹⁸⁾。こうしたシステムは、秘書やコールセンター等の対人業務、高齢者の話し相手やカウンセリング、家庭における日常的なパートナーやペッ

⁽¹¹⁰⁾ “Overview.” Human-Agent Interaction Website <<http://hai-conference.net/>>

⁽¹¹¹⁾ コンピュータアニメーションにより表現される仮想キャラクタの動く対話的なシステム。

⁽¹¹²⁾ 人工知能学会編 前掲注(3), pp.870-873. (山田誠二「ヒューマンエージェントインタラクション」)

⁽¹¹³⁾ Joseph Weizenbaum, “ELIZA: a computer program for the study of natural language communication between man and machine,” *Communications of the ACM*, Vol.9 No.1, 1966.1, pp.36-45.

⁽¹¹⁴⁾ 河原達也・荒木雅弘 (人工知能学会編)『音声対話システム (知の科学)』オーム社, 2006.

⁽¹¹⁵⁾ 嵯峨山茂樹ほか「擬人化音声対話エージェントツールキット Galatea」『情報処理学会研究報告 音声言語情報処理』2002-SLP-045, 2003.2, pp.57-64. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_uri&item_id=57254&file_id=1&file_no=1>

⁽¹¹⁶⁾ 頭部をデフォルメした顔ロボットで、眉、目、口、耳の動きによって表情を作り出すことができる。Cynthia Breazeal and Brian Scassellati, “A Context-Dependent Attention System for a Social Robot,” *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1999, pp.1146-1153.

⁽¹¹⁷⁾ 身体性と社会性については次の文献を参照。岡田美智男ほか編『身体性とコンピュータ』共立出版, 2001; Cynthia Breazeal, “Toward sociable robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.42 No.3-4, 2003.3, pp.167-175.

⁽¹¹⁸⁾ 山田誠二『人とロボットの〈間〉をデザインする』東京電機大学出版局, 2007.

トといった代替サービスを提供し、人間の生活を豊かにすることができる。また、こうしたシステムの研究は、人間の認知や思考などの側面から知能の枠組みを解明し⁽¹¹⁹⁾、コンピュータ科学の発展に貢献する可能性を秘めている。

2 研究分野

本節では、HAIにおいて特に重要な社会性と身体性に関する研究分野について述べる。

(1) 社会性

社会性に関する研究は、自己と他者を認識しながら相互理解を図っている人間の心理を分析し、その知見をシステムに反映させようとするものである。研究分野としては、人間がシステムを対話可能な存在と捉えたり、システムを自分とは異なる他者として認めたりするメカニズムに関する基礎研究がある。これらは、相手が心を持った他者であるとみなす、あるいは相手の意図を推定する仕組み（他者理解）や⁽¹²⁰⁾、他者がどのような考え方や信念に基づく存在かを理解する仕組み（他者モデル）など⁽¹²¹⁾、「心」の解明に関する基礎研究との結び付きが強い。また、最近では発達の研究に基づき、対人コミュニケーションが困難となるメカニズムを認知科学的に分析、解明する研究分野⁽¹²²⁾とも関連している⁽¹²³⁾。

また、社会性に関する研究は、会話参加者が会話の中でどのように振る舞うかという参与構造の研究⁽¹²⁴⁾や、集団での議論における意思決定のメカニズムを解明するマルチエージェントシステムの研究⁽¹²⁵⁾などとも関連している。

これらの研究は、相手の心を読む他者理解や共感といったコミュニケーションに関わる基礎研究とともに、AIが、人間に親和性の高いインタフェースとなり、社会のあらゆるシステムに取り込まれるために重要である。

(2) 身体性

身体性に関する研究は、人間との視覚や接触を通じたやり取りにおける様々な身体表現の実現を目的とし、相手とのやり取りの中から情報を得て、状況を把握し、感情などの内部状態を変化させ、自律的にアクションを起こす、「心」と連結したシステム、すなわちインタフェース・エージェントと呼ばれる研究分野である⁽¹²⁶⁾。

(119) 安西祐一郎『認知科学と人工知能』（計算機科学/ソフトウェア技術講座 17）共立出版、1987。

(120) 例えば、子安増生ほか「「心の理論」獲得前後の他者の心の理解過程—事例分析による検討—」『京都大学大学院教育学研究科紀要』No.46, 2000.3, pp.1-25. <<http://hdl.handle.net/2433/57383>>

(121) Kim Bartholomew, "Avoidance of Intimacy: An Attachment Perspective," *Journal of Social and Personal Relationships*, Vol.7 No.2, 1990.5, pp.147-178.

(122) 山本淳一・楠本千枝子「自閉症スペクトラム障害の発達と支援」『認知科学』Vol.14 No.4, 2007, pp.621-639. <<https://doi.org/10.11225/jcss.14.621>>

(123) 渡辺絢子ほか「2A1-E24 顔特徴量の発見と選好性の獲得—応用行動分析による自閉症児の学習モデル（認知ロボティクス）—」『ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集』2008.6.

(124) 榎本美香・伝康晴「3人会話における参与役割の交替に関わる非言語行動の分析」『言語・音声理解と対話処理研究会（人工知能学会研究会資料）』No.38, 2003.7, pp.25-30.

(125) 「Ⅷ マルチエージェントシステム」を参照。このほか、高橋正浩・生天目章「個々の非合理性に基づくマルチエージェントの合意形成法」『電子情報通信学会論文誌. D-1, 情報・システム. I, 情報処理』Vol.82 No.8, 1999.8, pp.1093-1101.

(126) 間瀬健二ほか「インタフェース・エージェントに関する基礎検討」『情報処理学会研究報告 ヒューマンインタフェース研究会報告』1996-HI-069, 1996.11, pp.55-60. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_uri&item_id=37311&file_id=1&file_no=1>

HAIが自らの感情を表現する手段として、ロボット制御、コンピュータグラフィクス、顔表情の分析・表出などの研究が進められている。人間は、ある対象とのやり取りにあたって、その対象の知能や「心」の機能を想定する際に、対象の外観や振る舞いに強く影響を受けることが知られている⁽¹²⁷⁾。HAIの身体性が十分でなければ、人間らしい心を持たない単なるAIとみなされシステムの受容性に影響する可能性があるため、身体性に関する研究は重要である。

3 実社会での応用

HAIの応用が考えられる分野としては、医療、教育、介護、スポーツ、対人サービス業などが挙げられる。これらの分野は、人間との円滑で温もりのあるコミュニケーションによってサービスの価値が高まる可能性があり、将来的にはHAIを導入したコミュニケーションロボットや仮想エージェントが新しい「人材」として受け入れられるかもしれない。特にHAIは、相手の心理を理解する能力を持つことが想定されるため、心理学・認知科学・精神医学・心理カウンセリングといった、心の分析や治療に関わる分野への応用が期待される。傾聴・カウンセリング、またペットといった、感情知能を持ち他者の感情を鑑みる社会性を重視したエージェントの活用は、核家族化や高齢化が進む社会環境の中で、他者との関わりによる精神的安定をもたらすことが期待される。

HAIが早期に普及し得る用途としては、家庭用ロボットが挙げられる。これは、医療用など業務用の用途と比較して、緩やかな技術発展が許されると考えられるためである。

日本はアニメーションやゲーム業界におけるコンテンツ生成技術に強みを持ち、擬人化コンテンツとしてのキャラクターデザインにもたけている。また、国際的なHAI研究コミュニティに多くの日本人研究者が参加するなど、日本は世界をリードする立場にある⁽¹²⁸⁾。このため、日本の得意分野を生かしながら、HAIの研究開発や実用化を推進していくことが重要であろう。

4 今後の課題

HAIに関する課題には、技術的課題と倫理的課題とがある。技術的課題については、人型ロボットや仮想エージェントが人間の代替として社会に受け入れられるように、他者を理解する能力（社会性）とともに、身体的な表現能力（身体性）を向上させることが挙げられる。

倫理的課題としては、人型ロボットや仮想エージェントを人間とみなして生活することを想定した場合、人間やこうした機器・システムに求められる倫理的態度は、従来とは一線を画するものとなる、ということがある。人間とみなされている機器・システムに対する扱いが失礼であったり、非人道的なものであったりした場合、それを見た第三者に何らかの印象や精神的な影響を与え、それが実際の人間社会のモラルに悪影響を及ぼすかもしれない。一方、機器・システムを利用する側が、人間の心理を理解できる能力を悪用して、詐欺や洗脳など人間の行動に影響を及ぼす可能性もある。機器・システム設計者自身の倫理が問われるだけでなく、機器・システムが表現する感情や倫理に関する適切な設計について、基本的な枠組みの構築が求

⁽¹²⁷⁾ Jeremy N. Bailenson et al., "The independent and interactive effects of embodied-agent appearance and behavior on self-report, cognitive, and behavioral markers of copresence in immersive virtual environments," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.14 No.4, 2005.8, pp.379-393.

⁽¹²⁸⁾ "Steering Committee." Human-Agent Interaction Website <<http://hai-conference.net/steering/>>

められている⁽¹²⁹⁾。

執筆：関西大学総合情報学部 教授 よねざわ 米澤 ともこ 朋子

VI ロボット

1 注目されるに至った社会的背景

(1) ロボットの定義

ロボットという技術概念は、アニメ等に描かれるロボットや工場内で使われる製造機械にとどまらず、「物理的空間と相互作用する情報機械」と広く定義するのが最も適切であろう。旧来、ロボットの定義として、センサ系・制御系・駆動系という要素技術を中心に定義することが多かったが、情報技術の急速な進歩により、その定義ではとらえきれない広がりを見せているのがロボットである。例えば、自動車については、自動運転車はもちろんのこと、踏み間違い防止、自動停止、自動ワイパーといった知的機能もロボット技術の応用である。また、センサー（感覚器）やアクチュエータ（動作器）を備え、人間の動きに応じて様々なサービスを提供する部屋であるインテリジェントルームもロボットの一種である。

さらに、ロボットの機能が「ロボット」という物理的な存在に閉じていない場合もある。例えば、AIを用いたスマートスピーカー⁽¹³⁰⁾のように、音声認識など一部の機能を、インターネットを通じたクラウドコンピューティング⁽¹³¹⁾で処理することも実用化されており、センサ、知能・制御系、駆動系の各機能が物理的に分散しているものについて、それらを総称してロボットと呼ぶことも増えてきている。

このように、ロボットには機械制御・情報処理・知能処理の各技術が寄与している。

(2) ロボットをめぐる近年の動向

ロボット技術は、ほぼ製造機械としての応用に限られていたが、近年は幅広い応用展開が期待され⁽¹³²⁾、徐々に身近なものとして扱われるようになってきた。この応用分野の拡大に貢献しているのは、主として、コンピュータの小型化・高速化や、半導体、微小電気機械システム（Micro Electro Mechanical Systems: MEMS）⁽¹³³⁾などの技術の進歩による機器の小型化・高機能化である。特にコンピュータの高速化は、複雑な行動制御をリアルタイムのデジタル処理で可能にし、工場等のロボット専用に整備された環境以外でもロボットを動作可能にしている。また、AIやインタフェースの進展に伴い、複雑な作業や任務を実行することが可能になっている。これにより、人間との相互作用を必要とする家庭用途、介護用途などへの応用の可能性が広がっている。

⁽¹²⁹⁾ 久木田水生「ロボット倫理学の可能性」『京都大学文学部哲学研究室紀要』No.11, 2009.3. <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/71114/1/prospectus11_Kukita.pdf>

⁽¹³⁰⁾ インターネットに接続して音声操作で音楽・ニュースを聴くことや家電の操作等を可能にしたスピーカー。「IV 音声インタフェース」及び「VII IoT」も参照。

⁽¹³¹⁾ 「VII IoT」の「1 (2) インフラ環境の充実」も参照。

⁽¹³²⁾ 「ロボットの将来市場予測を公表 2035年には9.7兆円へ成長が期待」2010.4.23. 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ウェブサイト <http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0095A.html>

⁽¹³³⁾ 電子回路、機械構造、センサ等を一つの基板上に集積化した微細デバイスをいう。

他方、高齢化・人口減少や国際競争力強化といった課題に対応するため、様々な具体的なニーズに応じたロボット技術の適用が期待されている。介護ロボットや自動運転車は高齢化社会への直接的な解決策として期待されている。インフラ点検や土木・建築の分野でのロボット活用は、人手不足を補う切り札と考えられている。また、東日本大震災に伴う原発事故の処理における放射線レベルの高い環境下での作業は、ロボットの活用以外の方法はないことから、幅広い技術開発が望まれている。

国際的に見ても、ドイツ連邦政府が推進する「インダストリー 4.0」⁽¹³⁴⁾ や、アマゾンの自動化倉庫など、製造分野や流通・運輸分野を中心にロボット技術の高度化が急速に進められている。中国・韓国や東南アジアにおいても、ロボット技術は国際競争力の源泉の一つとして扱われており、各国で技術開発の強化が行われている。

また、ロボットの競技会も、技術開発や教育の起爆剤として注目されている。20年以上続いている国際的なロボット競技大会「ロボカップ (RoboCup)」(1997～)⁽¹³⁵⁾ を始め、米国では国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) による各種競技会⁽¹³⁶⁾ が、欧州では「欧州ロボットリーグ (European Robotics League)」(2016～)が開催され⁽¹³⁷⁾、日本でも「ワールドロボットサミット (World Robot Summit)」(2018、2020) が計画されている⁽¹³⁸⁾。アマゾン「アマゾンロボティクスチャレンジ (Amazon Robotics Challenge)」を開催し、同社の自動化倉庫を高度化する技術開発などを奨励している⁽¹³⁹⁾。

2 技術動向

ロボット技術は、各種要素技術とそれらの統合化・デザイン技術の総体であることから、技術ごとに技術動向を述べていく。

(1) センシング技術

センシングは、ロボットが外界の状態を認識するために使われる技術である。近年進展が目覚ましいのは、深層学習 (ディープラーニング) など機械学習による識別技術である⁽¹⁴⁰⁾。特にロボットの視覚・聴覚に相当する画像認識、映像認識、音声認識の性能は、この10年で急速に進歩した⁽¹⁴¹⁾。

機械学習の性能を最も左右するのは学習に使うデータの量と質であり⁽¹⁴²⁾、センシング技術を向上させるには、データの収集と蓄積が最も重要とされている。

⁽¹³⁴⁾ Industrie 4.0 Website <<http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Home/home.html>> 「VII IoT」の「3 実社会での応用」も参照。

⁽¹³⁵⁾ RoboCup Federation Website <<http://robocup.org/>>

⁽¹³⁶⁾ 自動運転車のレースである「グランドチャレンジ (Grand Challenge)」(2004、2005) 及び「アーバンチャレンジ (Urban Challenge)」(2007)、人型ロボットによる作業を競う「ロボティクスチャレンジ (Robotics Challenge)」(2012) が開催された。

⁽¹³⁷⁾ European Robotics League Website <https://www.eu-robotics.net/robotics_league/>

⁽¹³⁸⁾ World Robot Summit ウェブサイト <<http://worldrobotsummit.org/>>

⁽¹³⁹⁾ Amazon Robotics Website <<https://www.amazonrobotics.com/>>

⁽¹⁴⁰⁾ 「I 知識処理・機械学習」を参照。

⁽¹⁴¹⁾ 画像認識と映像認識は「III 画像獲得・認識」を、音声認識は「IV 音声インタフェース」を参照。

⁽¹⁴²⁾ 大野和則ほか「データ工学ロボティクス—ロボットの知能はセンサデータから生まれる—」『日本ロボット学会誌』Vol.33 No.2, 2015.3, pp.97-99. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/33/2/33_33_97/_pdf>

(2) 動作技術

ロボットの動作を担う技術で近年進展が著しいのは、回転翼型飛行ロボット（いわゆる「ドローン」）に代表される飛行技術である⁽¹⁴³⁾。飛行ロボットの研究の歴史は古いが、計算機技術の進歩による制御用計算機の小型化・高速化により、近年飛行ロボットが急速に進歩し、応用が拡大した。現在、更に高度な制御技術や複数の飛行ロボット制御などの技術開発が行われている。

地上の移動方式としては車輪型が大半を占めるが、人間と同じ作業空間で活動できる二足歩行を含めた脚型ロボットの研究開発も進展している。特に、米ボストン・ダイナミクス（Boston Dynamics）社や日本のシャフト（SCHAFT）社の脚型ロボットは完成度が高く、多くの注目を集めている⁽¹⁴⁴⁾。

アクチュエータ（動作器）としては、現状ではほぼ全てモータが使われているが、より滑らかで柔軟な動作を実現する次世代アクチュエータの研究が進められている⁽¹⁴⁵⁾。特に人間と接しながら活動するロボットの場合、人間の動きと親和性の高い動きを実現する人工筋肉などの研究が進められている。

(3) 動作の計画（行動計画）

ロボットの動きを知的に計画する手法が開発されている。この分野では、複雑な加工や高効率な行動を可能とするため、複数ロボットや複数アクチュエータを協調的に行動させる計画立案に関する研究開発及び実装が進められるようになってきている。

協調的な行動計画は、人間とロボットの協調においても重要となる。近年、人間と協調して動作する製造用ロボットが商品化されており⁽¹⁴⁶⁾、今後、人間の動作に合わせてロボットを制御する技術の開発が進むと予想される。

また、自動運転車や飛行ロボットなどが一般的になると、ロボット間で行動を協調させるための交渉技術も必要となってくる。ロボット間の協調に必要な AI 間の交渉技術は、日本の産業競争力懇談会でも推進テーマとして取り上げられている⁽¹⁴⁷⁾。

(4) 統合化・デザイン技術

ロボット技術では、バランスの取れた統合化（インテグレーション）技術やデザイン技術も重要である。ここで言う「デザイン」とは、見た目の良さだけでなく、メンテナンスや運用のしやすさを含めた総合的なデザインを指す。一般の情報機器に比べ、ロボットでは各部分の重量・

⁽¹⁴³⁾ 「特集 飛行ロボット研究の最前線（1）」『日本ロボット学会誌』 Vol.34 No.1, 2016.1, pp.1-32; 「特集 飛行ロボット研究の最前線（2）」『日本ロボット学会誌』 Vol.34 No.2, 2016.3, pp.1-60; 野波健蔵 「ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線」『情報管理』 Vol.59 No.11, 2017.2, pp.755-763. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/johokanri/59/11/59_755/_pdf/-char/ja>

⁽¹⁴⁴⁾ 両社とも米グーグル社の持ち株会社アルファベット（Alphabet）の傘下にあったが、2017（平成29）年6月、日本のソフトバンクグループが買収すると報じられた。「ロボ VB2 社買収 ソフトバンク、グーグルから」『日本経済新聞』2017.6.9, 夕刊, p.1.

⁽¹⁴⁵⁾ 「特集 次世代アクチュエータが描く未来像」『日本ロボット学会誌』 Vol.33 No.9, 2015.11, pp.1-34.

⁽¹⁴⁶⁾ 「デンソーウェーブ初の人協働ロボット、「COBOTTA」の受注を11月29日（水）から開始」デンソーウェーブウェブサイト <http://www.denso-wave.com/ja/info/detail_1000.html>; 「人協働ロボット MOTOMAN-HC10 を発売」2017.6.8. 安川電機ウェブサイト <<https://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/product/31940>>; “Human-robot collaboration (HRC).” KUKA Website <<https://www.kuka.com/en-us/technologies/human-robot-collaboration>>

⁽¹⁴⁷⁾ 産業競争力懇談会「2017年度プロジェクト中間報告 人工知能間の交渉・協調・連携」2017.10.13. <<http://www.cocn.jp/thema98-M.pdf>> 産業競争力懇談会は、産業界の有志で構成され、科学技術政策や産業政策などの政策提言を行っている。

サイズ・形状などのすり合わせが重要であり、目的・用途に合わせたバランスの取れた統合化や、可動部分の修理やセンサの調整など運用上の利便性も重要な技術要件となる。このため、目的・用途に応じたロボット技術の統合化を主業務とする企業も数多く出てきている⁽¹⁴⁸⁾。

また、インターネットやクラウドコンピューティングが一般的になっている現在、ロボットもロボット単体で機能を閉じる必要がなくなっている。例えば、音声認識や画像認識、行動計画などを、インターネットを通じてクラウド上で行わせることで、高度で複雑な処理や動作を実現することができる。こうしたインターネット技術とのすり合わせも統合化技術の重要な要素となる。

(5) ソフトウェア・標準化

ロボットは、要素技術や機能が多様であり、目的・用途によってそれらを柔軟に組み合わせるためのソフトウェアと、それを開発する際のよりどころとなる標準が重要になってきている。ロボット用ソフトウェアの標準としては、「Robot Operating System (ROS)」⁽¹⁴⁹⁾及び「Robot Technology Middleware (RTM)」⁽¹⁵⁰⁾が知られている。ROSは米国を中心に開発され、現在最も広く使われている。RTMは日本が主導して開発しており、速いレスポンスが要求される細かい制御を得意としている。また、ROSとRTMを橋渡しするツールも開発されている。

シミュレーション用のソフトウェアも重要である。一般的なロボット用のシミュレーションを行うソフトウェアとしては、ROSをベースとする「Gazebo」⁽¹⁵¹⁾と、RTMをベースとする「Choreonoid」⁽¹⁵²⁾がある。両者とも、様々なロボットに適用できるようになっており、ロボット用ソフトウェアの開発に役立てることができる。また、人間とロボットの相互作用についてのシミュレーションができる「SIGVerse」なども開発されている⁽¹⁵³⁾。今後、人間と協働するロボットの活用が増えると予想されることから、このようなシミュレーション用ソフトウェアの存在は重要である。

3 実社会での応用

(1) 製造分野

製造分野では、今後、人間と協働して製造工程を担うロボットの活用が増えてくると考えられる。特に、付加価値の高い多品種少量生産への移行を容易にするため、人間とロボットが並んで同時に製品の加工を行うことが一般的になる可能性がある。

なお、布や食品のような柔らかいものや、歯車のかみ合わせのように微妙な圧力調整が必要なものは、ロボットでは扱いにくい。現在、これを克服するための研究が進められている。

(2) 過酷環境での応用

災害現場の復旧や原発事故の処理といった過酷な環境の作業の多くは、ロボットでなければ

⁽¹⁴⁸⁾ 瀬川友史「ロボットエンジニアリングの海外動向」『日本ロボット学会誌』Vol.33 No.5, 2015.6, pp.306-309.

⁽¹⁴⁹⁾ ROS.org Website <<http://www.ros.org/>>

⁽¹⁵⁰⁾ OpenRTM-aist Website <<http://www.openrtm.org/openrtm/>>

⁽¹⁵¹⁾ Gazebo Website <<http://gazebo.org/>>

⁽¹⁵²⁾ Choreonoid ウェブサイト (中岡慎一郎・産業技術総合研究所主任研究員による) <<http://choreonoid.org/ja/>>

⁽¹⁵³⁾ SIGVerse ウェブサイト (稲邑哲也・国立情報学研究所准教授による) <<http://www.sigverse.org/wiki/jp/>>

できないため、幅広い活用が期待されている。特に福島第一原発における廃炉処理では、人間が立ち入ることができない環境での活動が大半を占めるため、ロボットの開発が急務である。

また、今後の人口減少・人手不足に対処するため、過酷な環境での労働を代替するロボットの開発も重要である。具体的には、インフラ管理、土木建築現場、農業などへの適用が期待されている。

(3) 交通・運輸

自動運転については、現在、各国の企業・大学等で実用化に向けた研究開発が活発に進められている。既に自動ブレーキ、自動駐車などの技術が導入されているが、今後はより自律的な自動運転が実用化される見込みであり、社会における受容性や利用方法の検討などが課題となる⁽¹⁵⁴⁾。

運輸現場でのロボット活用は、アマゾン社の自動化倉庫などで既に部分的には実用化されており、完全自動化倉庫も実現が近づいている⁽¹⁵⁵⁾。今後は、自動運転との連携など、倉庫外での自動化を含めた技術開発が課題になると考えられる。

(4) 介護・福祉

介護・福祉分野では、高齢者や身体の不自由な者などが身体を動かすことを支援するロボットが実用レベルとなり商品も複数出ている⁽¹⁵⁶⁾。また、食事支援など介護の特定場面で使用されるロボットも実用化が進んでいる⁽¹⁵⁷⁾。ただし、こうしたロボットは基本的に単一の作業を支援するものであり、介護負担の軽減に過大な期待を持つことに慎重な意見も出されるなど課題が残されている⁽¹⁵⁸⁾。

(5) 家庭・オフィス等

家庭やオフィス等におけるロボットの活用も広がりつつある。特に、掃除と警備については、既に多くの商用ロボットが実用化されている。案内ロボットについては、特に「2020年東京オリンピック・パラリンピック」などのイベントを機に、外国人向けに多言語の音声インタフェースを備えたロボットの利用が広がる可能性がある。

また、人間とのコミュニケーションを行い、人間の活動を支援するパートナーロボット⁽¹⁵⁹⁾など数多くの製品が実用化されつつあり、今後は実用的な応用例が急速に広がると予想される。

(154) 『自動運転技術の動向と課題—科学技術に関する調査プロジェクト2017 報告書—』（調査資料2017-4）国立国会図書館調査及び立法考査局、2018は、自動運転をめぐる技術動向及び関連する様々な課題を取り上げている。

(155) 「STARUpX (3) ロジテック 倉庫は考えるロボである 最難関の仕分け完全無人 荷物の形は無限 3Dで認識」『日経産業新聞』2017.11.18, p.1; 「商品取り出し袋詰めするロボット、英ネットスーパー」2017.12.10. 日本経済新聞電子版〈<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO24362230X01C17A2000000/>〉

(156) 例えば、「世界初のサイボーグ型ロボット「HAL」」CYBERDYNE ウェブサイト〈<https://www.cyberdyne.jp/products/HAL/>〉

(157) 例えば、「食事支援ロボット マイスプーン」セコムウェブサイト〈<https://www.secom.co.jp/personal/medical/myspoon.html>〉

(158) 山内繁「介護ロボット 現状と課題」（第2回福祉先進都市・東京の実現に向けた地域包括ケアシステムの在り方検討会議資料）2015.7.30, pp.4, 14. 東京都福祉保健局ウェブサイト〈<http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/kourei/shisaku/chiiikihoukatsukaigi/02chiikihoukatsukeakaigi.files/06yamauchisama.pdf>〉

(159) 「パートナーロボット」トヨタ自動車ウェブサイト〈http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/〉

4 懸念事項

必ずしもロボットに限った話ではないが、先端技術を適用する際に必要となる安全性の確保や問題が生じた場合の責任の分担などに関する法制度の整備が遅れており、これが普及の足かせになることが懸念されている。例えば、自動運転車が交通事故を起こした場合、従来、運転者等に帰していた責任を、誰がどうやって担うのかについて社会的コンセンサスも形成されておらず、法制度も整備されていない。自動運転技術は、国として次世代の産業の核にもなることから、国際競争力を維持するためにも、法整備などを早急に進めることが求められている⁽¹⁶⁰⁾。

執筆：産業技術総合研究所人工知能研究センター 総括研究主幹 野田 五十樹^{の だ い っ き}

VII IoT

1 注目されるに至った社会的な背景

モノのインターネット (Internet of Things: IoT) という用語は、2000年頃に登場したものであり、当初はインターネット接続機能を有する機器という意味であったが、20年近く経過し、その言葉は、概念、サービス、機器など様々な意味を持つようになり、一言で定義するのは難しくなっている。IoTの典型例としては、米国ネスト (Nest) 社⁽¹⁶¹⁾ (2014年にグーグルが買収) の空調管理システムが有名である。空調制御機器がインターネットにつながることにより、各家庭の空調を自動制御するだけでなく、ピーク時の地域の電力使用量を制御するという新しいサービスが生まれている⁽¹⁶²⁾。ここでは、インターネット接続機能を有する機器 (IoT 機器) だけではなく、それらを活用したサービスも含めて解説する。なお、類似の用語としては、サイバーフィジカルシステム (Cyber Physical System: CPS)⁽¹⁶³⁾、マシンツーマシン (Machine-to-Machine: M2M)⁽¹⁶⁴⁾、ユビキタスコンピューティング (Ubiquitous Computing)⁽¹⁶⁵⁾ などがある。

IoTが注目されるようになった社会的背景としては、以下に示す4つの要因がある。

(1) 通信コストの低下

IoT機器は、低消費電力化及び低コスト化のため、LTE⁽¹⁶⁶⁾回線ではなく、Wi-Fi (無線LAN) やBLE (Bluetooth Low Energy) を用いて、周辺のネットワーク回線に接続し、それらを介してクラウドにデータを送る必要がある。スマートフォン、スマートウォッチ (腕時計型のウェアラブル機器) やアクティビティトラッカー (日々の運動量等を計測するウェアラブル機器) などWi-FiやBLEを搭載する機器の普及率が高まったことにより、通信モジュールの低コスト化が

⁽¹⁶⁰⁾ 「自動運転阻む責任の壁 過失巡り議論、道険しく」『日経産業新聞』2018.2.22, p.2.

⁽¹⁶¹⁾ Nest Website (<<https://nest.com>>)

⁽¹⁶²⁾ 「スマートホーム」のNest社 太陽光発電分野に進出」Forbes Japan, 2015.5.8. (<<https://forbesjapan.com/articles/detail/3942>>)

⁽¹⁶³⁾ 実世界 (フィジカル空間) に設置されたセンサから、インターネットを介してクラウド (サイバー空間) にデータを収集し、分析した結果を再度、実世界にフィードバックするという大きな概念。

⁽¹⁶⁴⁾ 主に工場を念頭においた用語であり、機械と機械がネットワークで接続され、連携して動くことをいう。

⁽¹⁶⁵⁾ ユビキタスとは遍在するという意味であり、ユビキタスコンピューティングは、身の回りの様々なものにプロセッサが搭載されて、インターネットに接続されたことをいう。

⁽¹⁶⁶⁾ 国際電気通信連合が定めるIMT-Advanced規格に準拠した無線通信システムのこと。第3世代移動通信システム (3G) と比較して高速な通信規格である。なお、LTEはLong Term Evolutionの略である。

進んだ。

そのため、これまで通信機能を有していなかった機器に通信機能を付加することが容易になり、IoT 機器を設置する環境が整った。

(2) インフラ環境の充実

IoT の普及に向けた課題の1つは、IoT 機器からのデータの蓄積であるが、そのデータの蓄積のためのクラウド環境は、2006年にアマゾンの「アマゾンウェブサービス」(Amazon Web Service: AWS) が登場して以来、劇的に変化している⁽¹⁶⁷⁾。AWSの料金は従量制であり、サービス黎明期はクラウドのコストを抑えつつ、サービス拡大時に性能を拡大することも柔軟にできるようになったため、IoT サービスへの参入が容易になった。その後、グーグルやIBMが同様のサービスを開始し、クラウド環境を自分で構築しなくてもIoT サービスを提供することが可能になった。また、深層学習などに必要な計算リソースもクラウドで手に入るようになり、参入障壁が極めて低くなっている。

(3) デジタルファブリケーションとクラウドファンディングの普及

事業を行う際にはモノとカネが重要な要素となる。3Dプリンタ⁽¹⁶⁸⁾などの機器が普及し、設計データを基に自由度の高いモノが安価で作れるようになり、アイデアを形にしやすくなった。こうした技術をデジタルファブリケーション (Digital Fabrication) という。また、クラウドファンディング (crowdfunding)⁽¹⁶⁹⁾ が普及したことにより、デジタルファブリケーションによって作成した試作品を商品化するための資金集めが容易になった。これらの動きは、IoT サービスの事業化を容易にする要因の一つとなっている。

(4) AI 技術の進展

IoT 機器から得られたデータを使って、新たな価値を創造することが可能になると考えられている。例えば、昨今のAI技術の進展により、IoT 機器から集めたデータを学習したAIを、様々な認識や判断に適用するという新たなIoT サービスへの期待が高まっている。

2 技術動向

(1) 通信技術

家庭用のIoT 機器は、通信方式として、普及率が高く、通信チップも安価なWi-Fiを利用した機器が大半である。しかし、屋外や広域の通信を行うIoT 機器では、Wi-Fiの通信範囲は十分でない。そのため、省電力広域無線通信技術 (Low Power Wide Area: LPWA) と呼ばれる低消費電力で広範囲をカバーする無線通信技術が広がりつつある⁽¹⁷⁰⁾。

LPWAの代表例としては、「LoRaWAN」、「SIGFOX」、「NB-IoT」が挙げられる。LoRaWANは、通信速度は250bps程度、通信距離は約10kmであり、日本では三大携帯電話会社を始め複数

⁽¹⁶⁷⁾ 総務省編 前掲注(1), p.91. <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/n2200000.pdf>>

⁽¹⁶⁸⁾ 3Dの設計データを基に、一枚ずつ層を積み重ねていくことによって立体モデルを製作する機械。

⁽¹⁶⁹⁾ インターネットを通じて多数の人から資金を募る仕組み。

⁽¹⁷⁰⁾ 総務省編『情報通信白書 平成29年版』2017, pp.128-130. <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n3300000.pdf>>

の事業者がこれを使ったサービスを開始しており、最も普及している LPWA と言える。最大の特徴は、Wi-Fi と同様に無線局の免許が不要であるため誰でも設置でき、その場合、通信料金が不要となることである。SIGFOX は、LoRaWAN と同じく、無線局の免許が不要な無線通信技術である。LoRaWAN と比較して、通信速度が 100bps 程度と遅いが通信範囲が約 50km と広い。主に水道メーターなどデータ量が小さい IoT 機器向けに利用されている。NB-IoT は、携帯電話で用いられている LTE という通信方式を IoT 向けに拡張したものであり、通信速度は 100kbps 程度、通信距離は約 20km である。既存の LTE 基地局を活用できることから全国をカバーできるという強みがある。ただし、無線局の免許が必要であるため、推進の主体は通信事業者に限られている。

(2) IoT 機器

IoT 機器では、インターネットを通じて機器を制御するための制御機器が必要となる。既にこうした制御機器の設計や試作品を開発するベースとなる電子基板⁽¹⁷¹⁾が普及し、またそれに接続可能なセンサや通信モジュールも安価に販売されている。そのため、誰もが簡単に IoT 機器を試作することが可能になっている。

IoT 機器が製品として市販される例も増えている。スマートフォンなどから遠隔操作ができる鍵（スマートロック）、監視カメラや、インターネットに接続して音声（人の声など）による操作で音楽・ニュースを聴くことや家電の操作等を可能にしたスマートスピーカーなどがその代表例である。このほか、エアコン、冷蔵庫、テレビなど従来の家電にも通信機能を備えた機種が少しずつ広まっている。

特に、AI 技術の進展により、音声認識の精度が飛躍的に高まったことから、スマートスピーカーの商品化が進んでおり⁽¹⁷²⁾、米イーマーケット（eMarketer）社の調査によると、米国におけるスマートスピーカーの利用者は 2017 年に 3560 万人に達するとされている⁽¹⁷³⁾。

3 実社会での応用

(1) 工場

ドイツでは、2011 年から「インダストリー 4.0」⁽¹⁷⁴⁾という技術政策を推進している。これは、工場内の機器をネットワーク化し、センサや AI と組み合わせることで、自律分散的に駆動するインテリジェントな生産システムを目指したものである。例えば、インダストリー 4.0 に取り組んでいるダイムラー（Daimler）社では、設計や生産におけるあらゆる場面でネットワーク化が進められている⁽¹⁷⁵⁾。ドイツ人工知能研究センター⁽¹⁷⁶⁾は、研究所内に模擬工場を作り、様々

(171) ラズベリーパイ（Raspberry Pi）やアルドゥイーノ（Arduino）などの制御用基板が知られている。

(172) 代表的なものとしては、アマゾンの「Amazon Echo」シリーズ、グーグルの「Google Home」シリーズが挙げられる。「IV 音声インタフェース」を参照。

(173) “Alexa, Say What?! Voice-Enabled Speaker Usage to Grow Nearly 130% This Year,” 2017.5.8. eMarketer Website <<https://www.emarketer.com/Article/Alexa-Say-What-Voice-Enabled-Speaker-Usage-Grow-Nearly-130-This-Year/1015812>>

(174) 前掲注⁽¹³⁴⁾

(175) “Production is becoming smart. Industry 4.0 and the networked factory.” Daimler Website <<https://www.daimler.com/innovation/case/connectivity/industry-4-0.html>>

(176) ドイツの AI 研究の中心的な研究機関であり、官民の共同出資による非営利有限会社の形態をとっている。Dengel, Andreas（黄瀬浩一翻訳）「ドイツ人工知能研究センター（DFKI）の 20 年一成功への道筋とそれを可能とした人々」『情報処理』Vol.49 No.7, 2008.7, pp.810-817.

な企業と連携しながら実験を行っている⁽¹⁷⁷⁾。

(2) 交通

自動車におけるIoTとしては、ドライブレコーダーと自動車保険を連携したテレマティクス自動車保険が挙げられる。トヨタ自動車とあいおいニッセイ同和損害保険は、インターネットに接続された車から得られる運転情報を基に、保険料のうち運転分保険料の最大80%を割引く保険の販売を2018（平成30）年1月から開始している⁽¹⁷⁸⁾。

また、配車サービス事業を営む米ウーバー・テクノロジーズ（Uber Technologies）社では、過去の利用状況や交通状況に合わせて、乗り合いサービスのルートを変更するシステムを運用している⁽¹⁷⁹⁾。

(3) 住宅

住宅におけるIoTの代表事例として、米ネスト（Nest）社のサーモスタットが有名である。ネスト社のサーモスタットは、センサとAI（機械学習）によって、住宅の空調を自動制御することにより、快適性を保ちつつ電気代を20%低減できるという。さらに、電力会社は、サーモスタットに蓄積されたデータを活用することで、電力の需要予測が可能となり、これによって削減されたコストの一部は消費者に還元されている⁽¹⁸⁰⁾。

別の事例としては、前述したスマートロックが挙げられる⁽¹⁸¹⁾。個人での利用のほか、「エアビーアンドビー（AirBnb）」などの民泊サービスにおいて、鍵の受渡し手段として利用されており、民泊サービスの拡大とともに急速に普及している⁽¹⁸²⁾。

(4) 福祉・健康

高齢者などの見守りサービスにIoT機器が利用されている。日本では、サービス付き高齢者向け住宅などにおいて、管理コストを低減するとともに、転倒等の見落としを防ぐためにセンサとAIを活用した在不在判定、転倒検知などの導入が始まっている⁽¹⁸³⁾。

個人向け健康情報管理（パーソナルヘルスケア）の分野では、多様なウェアラブルIoT機器が普及している。歩数等の人間の日々の活動を測定する活動量計を用いて、ウォーキングを支援

(177) “SmartFactory Laboratory.” Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) Website <<https://www.dfki.de/web/living-labs-de/living-lab-smartfactory>>

(178) トヨタ自動車株式会社・あいおいニッセイ同和損害保険株式会社「トヨタのコネクティッドカー向けに国内初の運転挙動反映型テレマティクス自動車保険を開発」2017.11.8. トヨタ Global Newsroom ウェブサイト <<https://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/mail/19575777>>; 「タフ・つながるクルマの保険」 あいおいニッセイ同和損害保険ウェブサイト <<http://aioinissaydowatsunagaru.jp/tough-tsunagaru/>>

(179) “ETA Phone Home: How Uber Engineers an Efficient Route,” 2015.11.3. Uber Engineering Blog Website <<https://eng.uber.com/engineering-an-efficient-route/>>

(180) 「Nestのビジネスモデル—住宅空間のあらゆるデータ収集を狙うIoTベンチャー旗手—」2015.8.31. nomad journal ウェブサイト <<https://nomad-journal.jp/archives/530>>

(181) 日本では、「アケルン（Akerun）」、「キュリオ（Qrio）」などが製品化されている。Akerun ウェブサイト（フォトシンス社） <<https://akerun.com/>>; Qrio（キュリオ）ウェブサイト <<https://qrio.me/>>

(182) 「ジェムアルト、スマホを鍵にできるスマートロックソリューション」2017.6.20. マイナビニュース <<https://news.mynavi.jp/article/20170620-a062/>>

(183) 「ICTを活用した高齢者住宅向け安否確認サービス提供開始」2017.9.20. ファミリーネット・ジャパンウェブサイト <<http://www.fnj.co.jp/news/pdf/2017/20170920.pdf>>

する福利厚生サービス⁽¹⁸⁴⁾が既に始まっているが、今後、センサの多様化、高度化に伴い、メンタルヘルスや病気の予防といった用途にまで利用が拡がると考えられる。

4 懸念事項

我が国では、製造業を中心とした過去の成功体験から、「ものづくり」で産業振興を図ろうとする考えが根強く、IoTの「T」、つまりモノにフォーカスする傾向があるが、Tから生まれてくるデータとAIを活用して新しい価値を創造するサービスの展開が必要である。

また、IoT機器が家庭に広がることで、プライバシーに関する問題も多発している。初期パスワードを変更していなかった73,000台ものカメラが全世界から閲覧可能な状態となった「Insecam事件」⁽¹⁸⁵⁾、IoT機能を搭載したテディベアを介した情報漏えい⁽¹⁸⁶⁾や性玩具メーカーによる秘密裏な情報収集⁽¹⁸⁷⁾など、家庭に普及したIoT機器が言わばトロイの木馬となって、プライバシー情報を送出する事件が相次いでいる。そのため、普及に際しては、プライバシーに配慮することが重要となる。

ただし、海外の場合は、まずやってみて、問題が起きたらルールを変えるという傾向がある一方で、我が国の場合は、サービスを開始する前にあらゆる問題について慎重に検討する傾向が強い。プライバシーへの配慮のためにIoTサービスの展開が欧米に後れを取ることにならないように、バランスを考えた戦略が必要となる。

執筆：奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 准教授 あらかわ ゆたか 荒川 豊

VIII マルチエージェントシステム

1 注目されるに至った社会的な背景

インターネットの発展とともに様々な情報システムが普及したことで、多様なデータが分散化・巨大化し、従来の中央集中型の情報システムに限界が生じつつある。こうした中、情報システムやデータの分散を前提とした分散型の情報システムに関心が集まった。このような背景から、1980年頃からマルチエージェントシステムの研究は本格化してきた⁽¹⁸⁸⁾。

例えば、個々の人間やロボットなどを、小規模なAIプログラム（エージェント）によって模擬（シミュレーション）し、人間社会やロボット群を、多数のエージェントの集合（マルチエージェントシステム）としてモデル化することにより、様々な問題解決への応用を試みることができる。

マルチエージェントシステムでは、個々のエージェントが、それぞれ異なる特徴、能力及び

⁽¹⁸⁴⁾ 例えば、「みんなの健康応援サイト「KENPOS」」イーウェルウェブサイト〈<https://www.ewel.co.jp/category/service/kenpos/p796/>〉

⁽¹⁸⁵⁾ “A Creepy Website Is Streaming From 73,000 Private Security Cameras,” 2014.11.6. Gizmodo Website 〈<https://gizmodo.com/a-creepy-website-is-streaming-from-73-000-private-secur-1655653510>〉

⁽¹⁸⁶⁾ “Cyber kid stuns experts showing toys can be ‘weapons’,” 2017.5.16. Phys.org Website 〈<https://phys.org/news/2017-05-cyber-kid-stuns-experts-toys.html>〉

⁽¹⁸⁷⁾ “This sex toy tells the manufacturer every time you use it,” *Splinter*, 2016.8.9. 〈<https://splinternews.com/this-sex-toy-tells-the-manufacturer-every-time-you-use-1793861000>〉

⁽¹⁸⁸⁾ マルチエージェントシステム初期の研究は、分散人工知能（distributed artificial intelligence: DAI）と呼ばれ、1980年に第1回分散人工知能ワークショップが米国で開催されている。Randall Davis, “Report on the Workshop on distributed AI,” *SIGART Newsletter*, No.73, 1980.10, pp.42-43.

目的を持って独立して意思決定すると同時に、互いに衝突を回避するよう協調するなど他者と相互に影響し合う。それによって、現実の人間やロボットの多様性とこれらの相互作用を考慮に入れた集団の性質や挙動の分析が可能となるほか、更にはそうした集団を制御する方法の設計にも役立てることができる。

マルチエージェントシステムの研究は、社会における集団の振る舞いを模擬するための計算モデルを追求する理論研究を核として推進されてきた。例えば、交渉や協調のプロトコル（手順）、競争市場のモデル化と分析、多種多様なサービス提供者と利用者のマッチングなど、社会における様々な行為や仕組みを対象として幅広く研究活動が展開されてきた。しかし、理論研究が実践的なシステム開発に結び付いた事例はなかなか増えず、分散型システムの構築技術として普及するには至らなかった。

しかしながら近年、モノのインターネット（IoT）の社会実装が急速に進行しており、2020年には、約304億個ものIoT機器がネットワークに接続されると予想されている⁽¹⁸⁹⁾。株式市場ではアルゴリズムトレード（コンピュータによる自動取引）が行われるようになっており、近い将来、自動車交通に自動運転車が混在することも現実味を帯びつつある。社会に埋め込まれた情報技術（IT）が各局面でどのような結果をもたらし、また社会全体にどのような影響を与えるかは計り知れず、これからの社会の設計は非常に困難な作業となっていくことが予想される。

マルチエージェントシステムでは、人間、ロボット、センサ、また各種の情報システムなど、多種多様な要素をエージェントとして個別にモデル化し、それらの集合における相互作用の計算・分析が可能となることから、複雑化する社会のモデル化に適した手法として、その有用性が改めて認識されつつある。

2 技術動向

(1) シミュレーション技術

現実の社会のような複雑なシステムをマルチエージェントシステムとしてモデル化し、エージェント同士の相互作用の連鎖を継続的に計算することで、システムの挙動の予測や分析を行う手法を「マルチエージェント社会シミュレーション」(Multi-Agent Social Simulation: MASS) という。MASSは、複雑な社会現象を再現するための有力な手法であり、社会の新たな制度や仕組み、サービスなどの設計や検証を支援することが期待される。

MASSの代表的な応用領域の一つが経済分野である。1999年に開始され10年以上にわたって実施された「U-Martプロジェクト」⁽¹⁹⁰⁾は、MASSによって構築した仮想の人工市場(U-Mart)を用いて、国内外での公開実験を活発に行い、金融市場の制度デザインを試みる取組であり、日本を代表する人工市場研究のプロジェクトとして多くの研究者が参画した⁽¹⁹¹⁾。U-Martは研究のみならず、情報科学や経済学の教育用教材としても有効で、多数の大学・大学院での教育

⁽¹⁸⁹⁾ 総務省『平成28年版情報通信白書』2016, p.80. (図表2-1-1-1) <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/white_paper/ja/h28/pdf/n2100000.pdf>

⁽¹⁹⁰⁾ 出口弘「進化する経済の実験室創生のために—バーチャル市場の参加型シミュレーションの意義—」『進化経済学論文集』Vol.3, 1999, pp.251-252.

⁽¹⁹¹⁾ Hajime Kita et al. eds., *Realistic Simulation of Financial Markets: Analyzing market behaviors by the third mode of science*, Tokyo: Springer, 2016.

に利用されている。⁽¹⁹²⁾

災害救助も MASS と親和性の高い分野の一つである。阪神・淡路大震災を受け、AI やロボットを用いた災害救助に役立つ技術を競うロボカップレスキューが構想され⁽¹⁹³⁾、2001 年から消防、レスキュー隊、災害救助ロボット等による災害救助活動を模擬する MASS を用いた国際的な競技会が開始されている。競技会を重ねる中で技術を向上させ、マルチエージェントによる災害被害予測や、防災計画の立案につなげる試みが今なお続いている。この試みは、実機のロボットを用いる競技会へと展開し、その成果が福島第一原発の原子力建屋に投入されたロボット「クインス (Quince)」の開発につながるなど、実際の災害活動支援に貢献している⁽¹⁹⁴⁾。

(2) 交渉技術

交渉は、マルチエージェントシステムの主要な研究対象分野の一つである。90 年代に入りエージェント間交渉の研究が活性化し、交渉は、「可能な合意案を見つけ出す探索的な計算のプロセス」として定義され⁽¹⁹⁵⁾、研究が行われたが、この段階では複数エージェントによる分散探索問題を解くための理論研究の域を出なかった。その後、エージェントに人間の嗜好（しこう）を伝えるための関数の設計や、実際の交渉に見られるような複数の論点が存在する交渉のプロトコルの研究などが進み、人間の代理としてエージェントが自動的に交渉を行うことを目指した技術開発が本格化している。

エージェントによる交渉技術を加速する試みとして、国際自動交渉エージェント競技会 (Automated Negotiating Agents Competition: ANAC)⁽¹⁹⁶⁾ が 2010 年より開催されており、様々な交渉状況下における効率的な戦略を備えたエージェントの研究開発が促進されている。ANAC では、エージェントは相手側の情報を知らされずに交渉を行う。これは実世界での交渉により近い設定ではあるが、交渉相手の情報が不足するため、ゲーム理論⁽¹⁹⁷⁾ の解概念やモデルに基づいた戦略を導入するだけでは不十分である。すなわち、ゲーム理論は、交渉に解（合意案）や均衡点が存在するかといった交渉問題の性質の分析には有用であるが、交渉主体の複雑な嗜好や、交渉相手に関する情報の不確実性、また交渉相手の行動に関する学習と予測など、ゲーム理論では扱いにくい要素を考慮した新たな交渉技術を開発することが求められている⁽¹⁹⁸⁾。

ANAC での交渉は、ゲームに関する情報が全ての参加者に共有されていない不完全情報ゲームの一種と見ることができる。これに対し、将棋や囲碁のように、相手側の情報も含め、ゲームに関する全ての情報が得られるゲームは完全情報ゲームと呼ばれる。近年、将棋や囲碁では AI が人間を上回るパフォーマンスを見せており、次の関心は不完全情報ゲームに移って

⁽¹⁹²⁾ 喜多一ほか「人工市場プロジェクト U-Mart の教育活動」『システム・制御・情報』Vol.49 No.7, 2005.7, pp.271-276. <https://doi.org/10.11509/isciesci.49.7_271>

⁽¹⁹³⁾ RoboCup-Rescue 技術委員会ほか編（田所諭・北野宏明監修）『ロボカップレスキュー——緊急大規模災害救助への挑戦——』共立出版, 2000.

⁽¹⁹⁴⁾ Keiji Nagatani et al., "Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots," *Journal of Field Robotics*, Vol.30 No.1, 2013.1・2, pp.44-63.

⁽¹⁹⁵⁾ Nick. R. Jennings et. al., "Automated Negotiation: Prospects, Methods, and Challenges," *Group Decision and Negotiation*, Vol.12, No.2, 2003, pp. 58-73.

⁽¹⁹⁶⁾ "Automated Negotiating Agents Competition (ANAC)." Negotiation Website (Interactive Intelligence Group, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics, and Computer Science (EEMCS), Delft University of Technology (TU-Delft)) <[http://ii.tudelft.nl/negotiation/index.php/Automated_Negotiating_Agents_Competition_\(ANAC\)](http://ii.tudelft.nl/negotiation/index.php/Automated_Negotiating_Agents_Competition_(ANAC))>

⁽¹⁹⁷⁾ ゲーム理論とは、複数の意思決定主体（人間やエージェント）が、その意思決定に関して相互作用する状況を研究する理論である。渡辺隆裕『ゼミナール ゲーム理論入門』日本経済新聞出版社, 2008.

⁽¹⁹⁸⁾ 伊藤孝行「マルチエージェントの自動交渉モデルとその応用」『情報処理』Vol.55 No.6, 2014.6, pp.563-571.

いる。マルチエージェント分野でもこの潮流が生まれており、前述の ANAC における不完全情報ゲームとしての交渉に関する研究開発のみならず、ゲーム理論を起点として研究開発されたエージェントのプレイヤーが、不完全情報ゲームであるポーカーで人間のトッププロに勝利するなど⁽¹⁹⁹⁾、技術応用が進んでいる。また、プレイヤーが人陣営と狼陣営とに分かれ、プレイヤー同士がだまし合い、時には協力・説得してそれぞれの正体を推定する不完全情報ゲームである「人狼ゲーム」を自動的にプレイするエージェントの研究開発が国内でも始まっている⁽²⁰⁰⁾。

3 実社会での応用

上記の技術分野に限らず、理論研究の成果が実社会での応用につながる事例が着実に蓄積されている。ここでは、その代表的な応用事例と有望な応用領域を紹介する。

(1) セキュリティ分野での応用

人間の交渉や提携を模擬するために研究されてきたゲーム理論を応用し、様々な場所のセキュリティを向上させることに成功した事例がある。

警備計画を立案する際は、警備の手薄なところを狙う攻撃者の行動を織り込みながら、限られた警備員をどのように配置すべきか、という難しい問題を解く必要がある。米国・南カリフォルニア大学のミリンド・タンベ (Milind Tambe) 教授らは、警備対象による重要度の差異を考慮しつつ、攻撃者に警備計画を予測させないためのランダム性を組み込んだ警備行動を計算するアルゴリズムを考案した。これを基にロサンゼルス国際空港における警備員・警察犬の巡回経路を決定するためのシステム「アーマー (ARMOR)」を開発し、採用されている⁽²⁰¹⁾。

このアルゴリズムは、米国連邦航空保安局におけるフライトスケジュール決定システム「アイリス (IRIS)」⁽²⁰²⁾ や、米国沿岸警備隊の警備順路を決定するシステム「プロテクト (PROTECT)」⁽²⁰³⁾ にも採用されるなど、様々な現場の警備に活用されている。

(2) 医療分野での応用

何らかのサービスの提供者と受益者の組合せを適切に決定するマッチングは、マルチエージェントの主要な研究対象分野の一つである。その理論が臓器移植のためのアルゴリズム開発に応用された事例がある。

⁽¹⁹⁹⁾ 「人工知能がポーカーでも人間のプロに勝利 カルネギーメロン大学の「Libratus」」2017.2.2. CNET Japan ウェブサイト <<https://japan.cnet.com/article/35095946/>>; “How an AI took down four world-class poker pros,” 2017.2.10. Engadget Website <<https://www.engadget.com/2017/02/10/libratus-ai-poker-winner/>>

⁽²⁰⁰⁾ 片上大輔ほか「人狼知能プロジェクト」『人工知能』vol.30 no.1, 2015.1, pp.65-73.

⁽²⁰¹⁾ Marc Ballon, “A Safer World,” 2015 Spring. USC Viterbi Website <<http://magazine.viterbi.usc.edu/spring-2015-2/features/a-safer-world/>>; James Pita et al., “Deployed ARMOR Protection: The Application of a Game Theoretic Model for Security at the Los Angeles International Airport,” *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: industrial track*, 2008, pp.125-132. <<http://teamcore.usc.edu/papers/2008/AAMASind2008Final.pdf>>

⁽²⁰²⁾ Jason Tsai et al., “IRIS - A Tool for Strategic Security Allocation in Transportation Networks,” *Proceedings of 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS-2009)*, 2009.5. <<http://teamcore.usc.edu/kiekintveld/papers/2009/trkot-IRIS.pdf>>

⁽²⁰³⁾ Eric Shieh et al., “PROTECT: An Application of Computational Game Theory for the Security of the Ports of the United States,” *Proceedings of 26th AAAI Conference on Artificial Intelligence(AAAI-2012)*, pp.2173-2179, 2012. <http://teamcore.usc.edu/people/eshieh/shieh_protect_aaai_talk_20120414.pdf>

米国では7万人を超える腎臓病患者が移植を待っており、移植手術を受けられるのは年間約1万人にとどまる一方、約4000人が命を落としていた。米国・カーネギーメロン大学のトゥオマス・サンドホルム (Tuomas Sandholm) 教授らは、病院の近接度などに基づく、腎臓提供者と腎臓病患者の高効率なマッチングアルゴリズムを開発し、2008年、全米臓器配分ネットワーク (United Network for Organ Sharing: UNOS) に採用された⁽²⁰⁴⁾。2010年以来、このアルゴリズムは継続的に利用され、自動的に腎臓移植の計画を生成している。例えば、60名の腎臓の提供者及び移植者から成る長大な臓器移植計画を生成、実行した例が報告されている⁽²⁰⁵⁾。

(3) 有望な応用領域

既に述べたように、近年IoTの社会実装が急速に進行するなど、将来の社会システムは複雑化し、その設計は困難になりつつある。複雑なシステムの挙動の予測や分析を行うマルチエージェント社会シミュレーション (MASS) は、こうした複雑な社会システムの設計において有望な支援技術となり得る。我が国では、2009年の横断型基幹科学技術研究団体連合⁽²⁰⁶⁾の分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ報告書において、社会システムの設計に対するMASSの有用性や期待が述べられている⁽²⁰⁷⁾。その流れは、ビッグデータやハイパフォーマンスコンピューティング (高性能計算) の活用によって本格化しつつあり、次のような萌芽 (ほうが) 的な試みが始まっている。

東京大学の和泉潔教授は、マルチエージェントによる人工市場シミュレーションを用いた経済市場の制度設計に着手している。東京証券取引所におけるティックサイズ (価格変動の最小単位) の変更による影響を大規模なMASSによって分析し、国内外の取引市場間での競争において、いかにシェアを守る (又は奪う) ことができるのか、市場設計に資する知見の抽出を試みている。⁽²⁰⁸⁾

交通の分野では、MASSによる交通システムの設計について、未来シェア社が、タクシー (デマンド型) と路線バス (乗り合い型) の長所を融合し、乗客とドライバーの間の通信により需要に応じて最適なルートで乗合車両を走行させることができる乗合車両システム「SAV (Smart Access Vehicle)」を開発している⁽²⁰⁹⁾。SAVの技術は、産業技術総合研究所の野田五十樹氏らがオンデマンドバスの導入効果検証のために開発したMASSを背景にしている⁽²¹⁰⁾。新しい交通システムの機能要件をMASSによって事前に検証し、実システムの開発・運用に生かした好例であり、交通以外の分野にも同様の試みが適用可能と考えられる。

⁽²⁰⁴⁾ David J. Abraham, et. al., "Clearing Algorithms for Barter Exchange Markets: Enabling Nationwide Kidney Exchanges," *Proceedings of the 8th ACM Conference on Electronic Commerce (EC-07)*, 2007, pp.295-304. <<https://www.cs.cmu.edu/~sandholm/kidneyExchange.EC07.withGrantInfo.pdf>>

⁽²⁰⁵⁾ Kevin Sack, "60 Lives, 30 Kidneys, All Linked," *New York Times*, 2012.2.18. <<http://www.nytimes.com/2012/02/19/health/lives-forever-linked-through-kidney-transplant-chain-124.html>>

⁽²⁰⁶⁾ 分野横断的に適用できる汎用的な科学技術を専門とする学会の連合組織 (特定非営利活動法人)。

⁽²⁰⁷⁾ 横断型基幹科学技術研究団体連合「分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ報告書」2009.3, pp.94-95. <http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/20fy-pj/oudan2.pdf>

⁽²⁰⁸⁾ 水田孝信ほか「人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析」『JPXワーキングペーパー』Vol.2, 2013.1.30. 日本取引所グループウェブサイト <<http://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/tvdivq0000008q5y-att/JPXWorkingPaperVol2.pdf>>

⁽²⁰⁹⁾ 「SAV (Smart Access Vehicle)」Mirai Share ウェブサイト <<http://www.mirai-share.co.jp/sav/>>

⁽²¹⁰⁾ 野田五十樹ほか「デマンドバスはペイするか?」『電子情報通信学会技術研究報告』Vol.2003 No.8, 2003.1.29, pp.31-36.

4 今後の課題

今後もマルチエージェント研究が理論研究にとどまることなく、新たな社会の仕組みの創出に寄与しつつ、実践的な取組を伴いながら発展していく事例が増えていくことが予想される。その際、支援する対象となる実社会をどのようにモデル化するかが課題となる。つまり、個々のエージェントをどの程度の詳細さでモデル化すれば、マルチエージェントシステムによって得られる解や予測が現実的な意味を持つのか、というエージェントモデリングの問題に直面する。この問題に対しては、モデル化の対象とする人間（ないしはその集団）の行動に関する十分な量のデータをいかに確保するか、またそれらのデータから人間の行動をいかに学習するか、といったデータ収集や学習に関する技術の開発が解決の鍵となるだろう。

執筆：立命館大学大学院情報理工学研究科 准教授 はっとり ひろみつ 服部 宏充

IX クラウドソーシング

1 注目されるに至った社会的な背景

クラウドソーシング（crowdsourcing）とは、不特定多数の人に仕事を依頼する仕組みや、それを実現するインターネット上のプラットフォームの総称である。クラウドソーシングにおける仕事への報酬の有無は様々であるが、クラウドソーシングが注目される契機となったのは、アマゾンによるクラウドソーシングのプラットフォーム「アマゾンメカニカルターク」(Amazon Mechanical Turk: MTurk)⁽²¹¹⁾である。MTurkを用いると、発注者は単純作業を容易に外注でき、作業者はインターネット上で作業をするだけで報酬が得られる。MTurkは大量の労働力を獲得できるプラットフォームとして成長を遂げ、国内外で同様のプラットフォームが多数登場した。

AI技術は、人間の判断を模倣するために、人間が作成した正解データを必要とする。例えば、写真に犬と猫のどちらが写っているかを判定するアルゴリズムを構築するためには、人間が分類した「犬の写真」と「猫の写真」が必要となる。クラウドソーシングはこのようなデータへの意味付け作業を大規模化する手段として、広く活用されている。さらに、AI技術を社会の問題解決に用いるためには、人間の知識や知覚、判断、意思決定との協調が必要不可欠である。AIシステムの内部に人間への問い合わせを組み込む「ヒューマンコンピューテーション」という考え方が提唱されており、クラウドソーシングはその実現基盤として注目を集めている。

2 技術動向

ここでは、クラウドソーシングの利便性を向上するための基盤技術の動向として、品質保証、ワークフロー制御、メカニズムデザインを取り上げる⁽²¹²⁾。

⁽²¹¹⁾ Amazon Mechanical Turk Website <<https://www.mturk.com/>>

⁽²¹²⁾ この項目は、鹿島久嗣ほか『ヒューマンコンピューテーションとクラウドソーシング』（機械学習プロフェッショナルシリーズ）講談社、2016、pp.24-68を参考にした。

(1) 品質保証

雇用者と作業者が継続的な信頼関係を構築できる従来の雇用形態とは異なり、クラウドソーシングでは、雇用者が作業者の能力、信頼性、意欲などを把握することが困難となるため、作業結果の品質保証が重要な課題となる。対応策としては、同じ作業を複数人に依頼することによって品質を担保する（冗長化）という方法がよく用いられる。このような場合に、各作業者の信頼性や作業の難易度を推定する統計的機械学習法の研究が進められている。

(2) ワークフロー制御

クラウドソーシングでは、ある作業の結果を別の作業で扱うといったように、複数の作業を組み合わせて実施することができる。これを利用して、ある作業者の結果の評価・修正を別の作業者が実施するというワークフローが研究されている。

(3) メカニズムデザイン

クラウドソーシングでは、作業の品質保証や速度向上のために、作業の実施能力と意欲を持った作業者の参加が不可欠である。こうした作業者の参加を促すため、作業の内容や報酬を適切に設計する「メカニズムデザイン」の研究が進められている。例えば、報酬を参加報酬と成果報酬の二種類に分けることで、不誠実な作業者の参加を防止する手法が提案されている。

3 実社会での応用

(1) 実社会での応用事例

(i) 大規模文字認識

大規模文字認識は、クラウドソーシングの初期から取り組まれている重要な応用事例である。AIには認識が難しい文字画像を人間に認識させるため、カーネギーメロン大学のルイス・フォン・アン（Luis von Ahn）准教授は、書籍をデジタル化する際の文字認識を効率的にクラウドソーシングするためのシステム「リキャプチャ（reCAPTCHA）」を開発した⁽²¹³⁾。ウェブサイトにアクセスしたユーザが人間なのか、あるいはコンピュータプログラムによる不正アクセスなのかを判定する際に文字認識テストをユーザに出題することがある。リキャプチャは、その出題の中に書籍中の文字画像を含めておくことで、そのユーザに文字認識の作業をさせることができる。

クラウドソーシングによる大規模文字認識は産業界でも活用されている。例えば、名刺をデータ化するサービスを提供する Sansan 社は、名刺の文字認識にクラウドソーシングを用いている⁽²¹⁴⁾。

(ii) 大規模アノテーション

画像・音声・動画データは日々大量に作られ、蓄積されている。これらの膨大なデータを効率的に分類・整理したり、容易に検索できるようにしたりするには、データへのアノテーション⁽²¹⁵⁾が必要不可欠である。クラウドソーシングによる大規模アノテーションは、AIの開発

⁽²¹³⁾ Luis von Ahn et al., “reCAPTCHA: Human-Based Character Recognition via Web Security Measures,” *Science*, Vol.321 Issue 5895, 2008.9.12, pp.1465-1468.

⁽²¹⁴⁾ 「Data Strategy & Operation Center」 Sansan 社ウェブサイト〈<https://jp.corp-sansan.com/dsoc/>〉

⁽²¹⁵⁾ 画像・音声・動画等のデータに対して注釈情報（メタデータ）を付与すること。

にも貢献している。

例えば、スタンフォード大学のフェイフェイ・リー (Fei-Fei Li) 准教授は、クラウドソーシングを用いて 1000 万枚以上の画像に対するアノテーションを実現し、「ImageNet」というデータセットとして公開した⁽²¹⁶⁾。2012 年に開催された、コンピュータによる画像認識精度を競う大会では、ImageNet の画像データを用いた深層学習 (ディープラーニング) による画像認識手法が高い精度を達成し、以降の深層学習ブームの起爆剤となった。

(iii) リアルタイムアプリケーション

クラウドソーシングを組み込んだリアルタイムアプリケーション (リアルタイムでタスクを処理するアプリケーション) が開発されている。カーネギーメロン大学のジェフリー・P・ビッグラム (Jeffrey P. Bigham) 准教授は、視覚障害者を支援するためのスマートフォン用アプリケーション「VizWiz」を開発した⁽²¹⁷⁾。例えば、「戸棚の缶詰の中からコーンが入ったものを選びたい」場合、視覚障害者はスマートフォンで戸棚の中を撮影するとともに質問内容を音声で録音し、写真と音声データを VizWiz に送信すると、数十秒ほどで回答が返ってくる。写真と質問に従って回答を作成するのは、クラウドソーシング上の作業員である。視覚障害者の質問が自動的に多数の作業員に送信されるため、質問とそれに対する回答 (質問応答) がほぼリアルタイムで行われる。現在の人工知能にとっては困難な問題である、画像・音声へのリアルタイム質問応答を、クラウドソーシングで実現した事例となっている。

(2) 有望な応用領域

(i) 翻訳・対話及び質問応答

翻訳・対話や質問応答のような作業の全てを、言語処理技術で行うことは現状では難しい。このため、言語処理技術で実施できる作業と、人間でないと対応できない作業とに分け、後者をクラウドソーシングによって行うという分業によって、効率的に作業を進めることが検討されている⁽²¹⁸⁾。

また、翻訳・対話及び質問応答の内容によっては、作業員に専門性が求められることがあり得る。こうした場合には、上述した品質保証の技術を応用して、作業員の専門性・信頼性を推定し、作業内容に適した作業員を選ぶといった対応が考えられる。

(ii) 問題解決のアイデア募集

クラウドソーシングを用いて問題解決のアイデアを募集する手法は、人類の知恵の集結とも言えるものであり、既に実施例がある。例えば、米国の国防高等研究計画局 (DARPA) は、軍用車のデザインをクラウドソーシングによって行った⁽²¹⁹⁾。また、研究開発上の課題を解決するアイデアをクラウドソーシングによって募集する「イノセンティブ (InnoCentive)」というプ

⁽²¹⁶⁾ Jia Deng et al., "ImageNet: A Large-scale Hierarchical Image Database," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp.248-255.

⁽²¹⁷⁾ Jeffrey P. Bigham et al., "VizWiz: Nearly Real-time Answers to Visual Questions," *Proceedings of the 23rd annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2010, pp.333-342. <<http://up.csail.mit.edu/other-pubs/vizwiz.pdf>>

⁽²¹⁸⁾ 中田敦 「機械と人間が得意を生かして翻訳を分業」 2016.1.5. 日経ビジネスオンライン <<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/061700004/122100063/>>

⁽²¹⁹⁾ "After Successful Design Challenge Competition and Testing, DARPA Begins Early Transition of Adaptive Vehicle Make Technologies," 2014.2.5. Defense Advanced Research Projects Agency.Website <<https://www.darpa.mil/news-events/2014-02-05>>

プラットフォームは、米 P&G 社などにより活用されている⁽²²⁰⁾。

今後は、アイデアのブレインストーミングや、アイデアを効率的に評価し、洗練していくプロセスに関する技術を確立することにより、クラウドソーシングによる問題解決が幅広い分野で活用されることが期待される。

(iii) 高齢者の活用

在宅での勤務を可能にするクラウドソーシングは、労働意欲のある高齢者に適していると言える。ただし、高齢者は身体的制約などから従事できる時間や作業量に限りがあることも想定しておく必要がある。そこで、複数の高齢者がクラウドソーシング上で仮想的なチームとして作業できるようにする技術が研究されている。

東京大学の廣瀬通孝教授は、日本 IBM と共同で「高齢者クラウド」というコンセプトを掲げ、研究を進めている。これは、高齢者の経験やスキルを基に、具体的な作業とのマッチングを行うとともに、複数の高齢者が仮想的なチームとして一つの作業に当たる場合に、その効率的な組合せやスケジュール編成等を実現するものである⁽²²¹⁾。

4 今後の課題

クラウドソーシングの活用が進んだ場合、作業者が不当に安い賃金で搾取される方向に向かっていくのではないかという懸念がある。例えば、クラウドソーシング市場では経済格差による労働搾取が起り得ることが指摘されている⁽²²²⁾。この問題は、作業者が不利益を被るだけでなく、長期的には作業品質の低下や参加者の減少など、雇用側にとっても不利益となるとも言われている。この問題に対しては、雇用者と作業者との間で相互評価する仕組みの導入、複数のプラットフォームでの作業者に関する情報の共有などによる、作業者の地位向上が解決策として考えられる。

執筆：京都大学大学院情報学研究科 助教 馬場 雪乃^{ぼば ゆきの}

⁽²²⁰⁾ ジェフ・ハウ（中島由華訳）『クラウドソーシングーみんなのパワーが世界を動かすー』早川書房、2009。（原書：Jeff Howe, *Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd Is Driving the Future of Business*, 2008.）

⁽²²¹⁾ 「「高齢者クラウド」の研究開発」ウェブサイト〈<http://sc.cyber.t.u-tokyo.ac.jp>〉

⁽²²²⁾ Rowland Manthorpe 「ギグ・エコノミー、「新たな貧困の種」を生み出しつつあるその実態：調査結果」『WIRED』2017.4.4. 〈<https://wired.jp/2017/04/04/gig-economy-jobs-benefits-dangers/>〉