解説

IoTアプリケーションを開発するための エージェント指向技術†

菅原 研次*¹・木下 哲男*²・顧 優輝*³

情報ネットワーク技術，ロボットや自動運転車などにとどまらず，IoT は産業全体の基盤となる技術として注目を浴びている．ドイツを中心としたヨーロッパのインダストリ 4.0，米国を中心としたインダストリアル・インターネットなど，産業のインフラストラクチャを構築する IoT 技術は，様々な国や企業による開発競争の時代になっている．IoT アプリケーションを効率的に開発するためには，特性の異なる，クラウド，デバイス，ネットワークの 3 つの要素を利用状況に適応して柔軟に統合する必要があるが，このための技術としてエージェント指向開発方法論が適していると考えられる．本文では，IoT アプリケーションを開発するためのエージェント指向技術の取り組みについて解説する．

1. IoT 技術の概観

1.1 IoT 技術の現状

1991 年に，ユビキタスコンピューティングの概念が提唱され [1]，新しい情報社会に向けたきらびやかな夢を与えた．しかし，当時はその概念を実現するための ICT 技術が普及していなかったことにより，アプリケーションの開発までは至らなかった．2000 年代になり，ICT 技術の発展とコンピュータやデバイスの低コスト化が進むと，ユビキタス技術は，スマート技

術と共に，実用化へ向けた技術開発が開始された [2]．

1999 年に，ケビン・アシュトン は，モノがインターネットにつながり，互いに情報を交換することにより，新しい製造や物流のインフラストラクチャが生まれることを提唱した [3]．はじめは RFID タグをモノに取り付けることにより物流の追跡アプリケーションの開発が試みられた．

この流れと並行して，米国ではサイバー・フィジカル・システム（CPS）の研究が注目されてきた [4]．CPS は，センサーネットワークとインターネットを複合したリアルタイムシステムを実現する技術であり，自動運転車やロボットなどのように実世界とインターネットコンピューティングを密に結合する技術を開発する [5]．米国のもう 1 つの潮流として，生産工程やサービスを含む統合的なビジネスモデルをデジタル化するインダストリアル・インターネットが 2012 年に GE により提唱された．現在，このアイデアを実現するためにコンソーシアムが結成されており，世界各国の大きな企業が参加している．このようないくつかの流れの全体を IoT と呼んでいる [6]．IoT に関連する産業でのアクティビティは，コンピュータやネットワーク産業を超えて広がり，社会の変革と関連付けて語られている [7]．

一方，ヨーロッパでは，ドイツを中心に，生産工程のデジタル化・自動化・バーチャル化を進める国家プロジェクトであるインダストリ 4.0 が推進されている [8]．これは，製造工場だけではなく，調達や保守のプロセスをインターネットにつなぎ，生産工程の全体の認識と最適な制御を自動化することにより，生産効率を高めコストを最小化することを目指すプロジェクトである [9]．製造機械メーカーだけではなく，電子機器メーカーや自動車メーカー，IT・通信企業などがその実現に取り組み，生産工程のすべてに関係する新しいインフラストラクチャができてくる．

† Agent-Oriented Methodologies for Developing Internet of Things Applications
Kenji SUGAWARA, Tetsuo KINOSHITA,
and Yuki KAERI

*1 千葉工業大学情報科学部
Faculty of Information and Network Science, Chiba Institute of Technology

*2 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

*3 目白大学メディア学部
Faculty of Media Studies, Meiji University

1.2 IoT 技術の今後の動向

2014 年に IEEE では IoT に関連する論文誌として IEEE Internet of Things Journal が開設され、IoT に関する多くの国際会議も開催されている。IoT に関するコンソーシアムの設立や Fog computing などのコンセプト提案の動きも活発である。米国の SmartAmerica Challenge や、日本の超スマート社会など、国家レベルでの取り組みも始められている [10]。ヨーロッパでは、IoT のアーキテクチャの研究プロジェクトが完了し¹、それに続いて iKaaS などのセキュリティを考慮した IoT プラットフォームの研究プロジェクトが進められた [11]。現在も多くの IoT プロジェクトが Horizon 2020 プロジェクトの中で進められている²。

近年、IoT に関する調査論文が多くの学術雑誌に掲載されている。その中で、今後チャレンジすべき問題として、デバイスの個数の増大への対処、IoT アーキテクチャの標準化とともに、ビッグデータ、頑健性、セキュリティ、プライバシー保護、Human-in-the-loop などの研究と実用化があげられている [12]。そして、それぞれの問題に関して、詳細な調査論文が発表されている [13, 14]。現在、これらの論文で指摘されている課題の解決に向けたさまざまな提案が行われ、さらに産業への応用や社会への適用が活発に進められている。

1.3 IoT のアーキテクチャ

これらの調査によれば、IoT アーキテクチャの今後の動向は、3 階層の構造アーキテクチャから 5 階層の構造アーキテクチャに向かっている。3 階層は、デバイス層、ネットワーク層、アプリケーション層（クラウド）から構成される。5 階層のアーキテクチャでは、ビジネス層が最上位層で、ビジネス層でアプリケーションを連携させ、ビジネスや社会的実装に対応したサービスを実現させる役割を持つ。

IoT システムは、クラウド中心からデバイスや無線ネットワークによるエッジネットワークとの連携システムへと拡張されている [15]。また、IoT の仕組みは、デバイスから取得されたビッグデータを、エッジネットワークにおいて分析することにより、インターネットに集中するパケット量を軽減するための有効な方法であると考えられている。

IoT システムの特性として、システムの利用者は移

動しその利用環境や状況は変化する。ネットワークは多数のアプリケーションにより共有され、それらの間で競合が発生する。したがって、白鳥らは、これらのアーキテクチャは、利用者の要求の変化やシステムの運用状況の変化に対して、その機能や性能を適応するやわらかいネットワーク構造を持つことを提案して、そのためのエージェント型アーキテクチャを開発している [16]。

2. エージェント指向技術の概観

2.1 人工知能とエージェント

人工知能は 1960 年代に推論技術への期待が高まったが、実用的なアプリケーションの開発には至らなかった。1980 年代には、知識処理技術への期待が高まり、様々なエキスパートシステムが開発され、あるものは利用され続けているが、知識獲得の壁を乗り越えられず汎用の技術にはならなかった。2010 年代に入り、機械学習技術が着目され、データ分析や認識の能力に優れたプログラムが作られ、知識獲得の壁を乗り越え、汎用の人工知能技術の実現が期待されている。

エージェントの概念は、1986 年にミンスキーにより最初の提案がなされた。これは、エージェントと呼ばれる知能を持たない要素が集まり、協調することにより、知能が実現される過程を研究する分野である [17]。エージェントは様々な概念で論じられているが [18]、その提案の少し前に脚光を浴びだしたオブジェクト指向技術と互いに影響を受けつつ研究が進められた。

エージェントは、自律性、反応性、協調性（社会性）、自発性のいずれかの特性を、あるいはそれらすべてを有する要素であり [19, 20]、これらの協調により構成されるマルチエージェントシステムが知能を持つことを目指している。したがって、知能を持つための仕組みとして、協調プロトコルや交渉プロトコルの研究が進められ、要素となるエージェントのモデルとして BDI エージェントなどが提案されている [21]。

2.2 複雑系とエージェント

相互に関連する要素が大量に集まって、全体の挙動が個々の特性からは簡単に推測できないシステムを複雑系と呼ぶ。例えば、生態系、社会・経済活動、気候、脳などは複雑系である [22]。複雑系の持つ性質は、数学的モデルによる解析、統計的解析あるいは、シミュレーション実験などにより調べられている。

社会活動、交通流など、人間を要素とする複雑系のシミュレーションは、人間のふるまいを模倣するエージェントを、ある環境の中に大量に設置し、これを観

1 IoT-A, Internet of Things Architecture, eu integrated project : <http://www.meet-iot.eu/iot-a-paper.html>

2 <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>, <https://iot-epi.eu/>

察することにより実現される。ミクロ的な要素の定義と、マクロ的なシステムの挙動が、エージェントシミュレーションにより説明される [23]。エージェントシミュレーションシステムのさまざまな開発ツールが提供されている [24]。

また、既存の知的機能を協調させることにより創発を実現したり、進化・発展の仕組みを説明するモデルとして研究されている。インターネットは、さまざまなデジタルシステムが、相互作用を行うマルチエージェントシステムと考えられる [25]、それらを動的に統合させるしくみが不十分である。インターネットの中で蓄積される膨大な情報を再利用させるためには、能動的な情報集約システムの実現が必要となる。

2.3 知的インタフェースとエージェント

近年、Siri やコンシェルジュなどのように、利用者が必要とするタスクを実行する音声対話アプリケーションが日常的に利用されている。Amazon, Pepper などのように、音声対話によりコミュニケーションを行う設置機器やロボットも市販されている。このような知的対話を行うアプリケーションを利用者エージェントと呼ぶ。

利用者エージェントには、音声認識・発話機能、対話制御機能、タスク発見機能、談話理解機能などの知的な処理機能が必要である [26]。これらの知識は、オントロジーや常識知識ベースの実装が大きな課題になっていたが、近年はインターネットの音声アクセスデータを集約し学習する機能により、実用化が進められている。

これらの利用者エージェントは、音声対話だけではなく、カメラやセンサーからのデータを学習したり、ウェブへのアクセス履歴や協調フィルタリングなどから、人のアクティビティや要求を学習し、環境や状況に応じた人の支援を行う。これらの機能は、自律ロボットや、自動運転などに利用されるであろう。

2.4 学習とエージェント

近年の人工知能に対する期待は、学習を行う汎用人工知能の研究が大きく進展していることによっていえる。学習機能は、深層学習などの脳-神経モデルを用いたシステムにより実現されている。この結果、チェス、将棋、囲碁などの対戦プログラムが人間に勝利するニュースが大きな話題となっている。

IoT により大量のデータがクラウドに蓄積され、それを分析し学習することにより、たくさんの分野で、人間の知的機能を凌駕するシステムが実現されることが予想されている [27]。

深層学習の機能は、入力パターンに対する出力パターンを大量のデータにより正しく対応するメカニズムにより実現される。この入出力パターンの対応を学習するメカニズムは、エージェントによっても実現される。

エージェントは、外部からの刺激に反応するためのルールや、正しい反応を熟考するための知識を記号として内部に持つ。従って、エージェントが動作する環境からの刺激に対して、適切に反応をするためのルールや知識を学習するしくみをプログラムすることができる。たとえば、強化学習のアルゴリズムをエージェントの即応ルールの学習に適用するなどの例がある [28]。

一方、エージェント間の協調処理を行うマルチエージェントシステムでは、その相互作用の中に学習のメカニズムを実現することが可能である。これは、地理的に異なる場所で活動するエージェントや、時間的に異なるタスクを行うエージェントの間の知識の共有の中に、あらたな協調の方法を獲得していく仕組みである。また、異なる領域で活動するエージェントや、異なるセンサー・アクチュエータなどを制御するエージェントの協調作業の方法を経験的に学習していく仕組みが必要である。IoT アプリケーションは、物理空間の特性に依存し、多様な利用者にサービスを状況に応じて動的に提供するため、環境に適応するために、マルチエージェントシステムの学習の技術が重要になる。

2.5 システム開発とエージェント

大規模なシステムを効率的に開発するための技術として、オブジェクト指向技術が提案され、現代のシステム開発の潮流を作ってきた。一方、インターネットが発展するとともに、利用者の要求に応じて移動するプログラムや状況に適応する知的プログラムの必要性が生じてきた。この概念に対応するためにエージェントプログラムが提唱され、このようなプログラムの動作・開発環境が提供された [29]。このようなシステムの開発方法は、エージェント指向開発技術と呼ばれている [30]。

初期のエージェントプログラムとして、Telescript 言語により移動エージェントの開発が行われた [20]。また、状況に対応して機能や構造を変化するための実現モデルを与える研究 [31] や、大規模システムに関するオブジェクト指向開発の後継としてエージェント指向開発方法論の研究が行われた [32]。エージェント指向システム開発方法論は、クラウドにおける多数のシステムの発見や連携に適切な設計手段を与える [33]。

IoT パラダイムは、多数の大規模システムの連携の仕組みを必要としていて、エージェント指向開発方法論はその1つのソリューションを提供するだろう。

3. エージェント指向開発技術の動向

3.1 エージェント指向開発手法の研究

この節では、システムやソフトウェアを効率的に開発するための観点から、エージェント技術を説明する。エージェント指向システムの開発方法論には、エージェントの構造と協調プロトコルを与える必要がある。

この立場から大きな影響を与えた最初の研究は、DARPA の Knowledge Sharing Effort プロジェクト (KSE) である。エージェント間のプロトコルは performative の体系として記述された。エージェントが協調するための知識記述言語である KQML は、その後のエージェントシステムのためのメッセージ記述言語の設計に大きな影響を与えた。

たとえば、強力な知識ベースを持ち、KQML を拡張したエージェントメッセージで通信を行う実用的エージェントプラットフォームである OMAS (Open Multi-Agent System) が開発され、多くの実用に向けたアプリケーションが開発された。OMAS は IoT の開発に向けた改良が現在も進められている [34]。

エージェントシステム開発のためのモデル、メッセージの標準化を進める組織として Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA)³が 1996 年に設立された。FIPA は、エージェント間プロトコルの仕様である Agent Communication Language (FIPA-ACL) を提案し、これに従ったエージェントの協調を行うための動作環境 FIPA-OS [35] や JACK [36] などのエージェントプラットフォームが提供された [37]。FIPA 標準のエージェント記述言語として JADE [37] が提供され、これを利用した多数のエージェント指向のシステム開発が行われた。JADE は現在までエージェントプラットフォームとしての改善と保守が行われている。日本でも、FIPA 対応のエージェントプラットフォーム SAGE の開発が行われた [38]。また、独自のモデルに従うエージェントプラットフォームとして、Zeus [39]、Bee-gent [40]、KODAMA [41] などの開発が行われた。さらに、エージェント指向開発の効率化を進めるためのフレームとして ADIPS が提案され [42]、ADIPS に基づくマルチエージェントシステム動作環境 DASH や開発支援環境 IDEA が提供され、これを利用したアプリケーションの開発が進められて

いる [43]。

また、協調プロトコルに着目し、インテリジェントな協調を目指す知的プロトコルの提案とプラットフォームの提供が行われた [44]。ロジスティクスのための実用エージェント言語を開発するための DARPA プロジェクトからスタートして、現在は企業によりシステム開発のエージェントプラットフォームとして、Cougaar がある [45]。Java プラットフォームで動作し、マルチエージェントシステムを Publish/Subscribe モデル [46] で協調させる方式を実現している。

3.2 エージェント指向開発環境の今後の動向

エージェント指向プログラミングは、協調型計算モデルの影響を大きく受けている [47]。アクターモデルは 1973 年にカール・ヒューイトによって提唱された並列分散処理のためのモデルであり [48]、エージェント間のメッセージ通信によるマルチエージェントシステムを構成するプラットフォームに適している。実装としては Erlang⁴が超分散システムの開発言語として使用されており、また最近では Erlang を参考に Scala 言語によって実装された akka⁵が、超分散システムの実装言語として用いられることが多くなっている。また、Clojure⁶という言語は反応的なシステムを実装するための言語として広く使われている。以上の実装言語を利用する場合は、自律的なシステムを作るために独自に自律機能を実装することが必要になる。

近年、エージェント指向プログラミング (AOP) が、大規模システムを開発するための新たなソフトウェア工学のパラダイム Agent-Oriented Software Engineering (AOSE) として確立されている [49]。

JaCaMo⁷は、Jason⁸というマルチエージェントシステムプログラミング言語、CArtAgO⁹というマルチエージェントシステムを開発し動作させる環境と Moise¹⁰というマルチエージェントシステムの組織を構成するためのフレームワークを統合したフレームワークである [50]。さらに、近年では SARL (Agent-Oriented Programming Language) [51] と呼ばれるエージェント指向開発のためのプログラミング言語と Janus¹¹と呼ばれる Java で実装されたマルチエー

3 <http://www.fipa.org/>

4 <https://www.erlang.org/>

5 <https://akka.io/>

6 <https://clojure.org/>

7 <http://jacamo.sourceforge.net/>

8 <http://jason.sourceforge.net/>

9 <http://cartago.sourceforge.net/>

10 <http://moise.sourceforge.net/>

11 <http://www.janusproject.io/>

ジェントプラットフォームの開発が進められている。

4. IoT とエージェント指向開発

4.1 IoT システムの特性

センサーやアクチュエータ、無線ネットワークの小型化、高性能化、低コスト化が進むとともに、物理空間に直接接するエッジネットワークの開発が必要になっている [52]。すなわち、インターネットやクラウド中心のシステム開発から、エッジネットワークを加えた IoT という新しい概念のシステムの開発へと、パラダイムが変化しつつある [53]。クラウドのコンピューティングリソースが、場所や時間に依存しない論理的なサービスが中心であるのに対して、エッジネットワークのリソースはデバイスの位置、データ取得の時刻、社会的な状況、物理空間の状況などに強く依存する処理やサービスが要求される。IoT システムの動作には、サービスを提供するための論理的な処理に加えて、デバイスの経年変化、バージョン、コンピューティングリソースの制約、通信やネットワーク処理の制約など、物理的、社会的制約との均衡を取る高度に知的な処理を必要とする。

IoT アプリケーションは、クラウド要素、インターネットやエッジネットワークを含めたネットワーク要素、物理空間で利用者や環境に直接インタラクションを行うデバイス要素から構成される。このとき、これらの種の要素が、自律的、反応的、協調的、自発的特性を持ち、アプリケーションを実現するためにそれぞれの要素が連携することを垂直連携と呼ぶことにする [54]。複数のアプリケーションが、連携して、複合アプリケーションを構成することを水平連携と呼ぶことにする [55]。IoT の開発には、垂直連携と水平連携のアーキテクチャを実現する仕組みが重要であることが指摘されている。

例えば、市民マラソンを例にとると (a) ある特定のランナーの走る状況を、そのランナーの友人や家族など特定の利用者に配信するサービス、(b) 競技参加者の健康面の見守りを、医療チームが行うサービス、(c) 市民マラソンの組織者（プロデューサ）のために、道路の規制の情報、観戦者数、競技中の事故、気候、記録などを集積し、分析するサービス、などのアプリケーションが考えられる。

これらのアプリケーションは、マラソンコース周辺のカメラなどのセンサーや、無線ネットワークなどの IoT 資源を共有する。また、競技者の状況により、これらの各アプリケーションの資源の競合が発生するので、サービス間の優先順位を動的に変更することが必要になる。

このような場合、それぞれのアプリケーションの生成や性能の変更のための垂直連携、アプリケーション間の競合解消のための水平連携を動的に実現することが課題となる。しかしながら、現状のオブジェクト指向開発だけでは、このような動的連携をとるための仕組みを実現することは、開発者の負担になる。この負担を軽減するための新しい開発パラダイムとして、エージェント指向開発の研究が進められている。

4.2 IoT とエージェント指向開発技術

IoT パラダイムは、スマートテクノロジーのパラダイムと似ている。スマートテクノロジーとは、スマートオブジェクトが垂直連携するデジタルシステムが自律的に相互に作用するエコシステムを、エージェントモデルを用いて実現する技術である [56]。また、水平連携をするためには、アプリケーションの自律性、自発性など、動作環境の変化に反応して互いに協調する性質が必要とされる。このような IoT の特性が必要なシステムの開発方法として、エージェント指向開発への期待が高まっている。

IoT のためのエージェント指向開発の事例として、(1) エージェント型ミドルウェア [57]、(2) IoT デバイス等をエージェント化し、JADE によりデータの取得や制御を行うスマートオブジェクト [56] や JADE の拡張 [58]、(3) ActorNet [59] アクターモデルにより、エージェントを実装、(4) Agilla [60] ワイヤレスセンサネットワークを構築するためのモバイルエージェントのためのミドルウェアなどの研究が進められている。さらに、次節で述べる ADIPS フレームワークの拡張が進められている。

5. ADIPS フレームワーク

5.1 ADIPS フレームワークの概要

この節では、著者らがこれまで開発を行ってきた ADIPS フレームワークについて概説する。ADIPS フレームワークは、クラウドのサーバプログラム要素、ネットワークにおける通信サービス要素やミドルウェア要素、エッジにおけるデバイス、データ、プログラム要素をエージェントによりラッピングして、エージェントの協調機能により連携してアプリケーションを動的に構成するためのフレームワークである [61]。

ADIPS フレームワークは、(1) ルール型知識表現言語による動作知識記述 [62]、(2) ユビキタスデバイスの柔軟性の高いラッピング機能、(3) 大規模分散システムを効率的に開発するためのリポジトリを利用した部品再利用機能 [63]、(4) エージェント指向設計・開発支援環境の実現を目指して研究が開始された。

ADIPS フレームワークのためのエージェント動作環境として、DASH が Java により実装された。DASH を利用してマルチエージェントシステムを作成するために、IDEA と呼ばれる開発支援環境が開発され、DASH/IDEA として、利用者に提供されている^[2]。IDEA はエージェントのプログラミング支援だけではなく、マルチエージェントの動作をデバッグする視覚的動作確認ツールを提供し、インターネットに分散する DASH エージェントのデバッグを支援する。

DASH エージェントは、プログラムだけでなく文書・情報をラッピング可能であり、エージェントメッセージを用いて、情報の検索・加工が可能である^[64]。リソースである情報のメタ情報をエージェントが持つことにより、情報間の能動的連携を行う。AIR という能動情報フレームワークは、DASH により実装され、さまざまなアプリケーションが開発されている^[65]。

5.2 IoT と ADIPS フレームワーク

IoT のアプリケーションを開発する上で多くの問題があるが、その中で垂直連携と水平連携の問題に絞って、ADIPS フレームワークでどのような解が提供できるかについて述べる。

垂直連携は、デバイス要素の機能、性能と、ネットワーク要素のスループット、レイテンシー、クラウド要素の処理携帯、内容などを、利用者の要求と対象とする物理空間の特性に合わせて動的に組み合わせるオーケストレーションの仕組みにより行われる^[66]。水平連携は、処理しているデータや情報の形式と意味をアプリケーションが共有し、互いの機能を利用するための API など共有する仕組みを作ったうえで、利用者やサービス提供者の要求に従って、動的にサービス連携を行うための仕組みを実現することが必要となる^[67]。

ADIPS フレームワークでは、垂直連携に必要なエージェント要素の仕様を属性リストの形式で連携知識として記述する。この知識を用いて、システムの組織化と動的に再構成を行う ADIPS プロトコルが提供されている。アプリケーションを DASH 動作環境で起動するアプリケーション起動エージェントは、リポジトリの部品を ADIPS プロトコルでマルチエージェントシステムとして動作環境に設置し起動する。それらのエージェントの連携により、アプリケーションが目的とするサービスを提供する。

ADIPS フレームワークは、ハードウェアや実行プログラムをエージェントプラットフォームから制御で

きる仕組みを動作環境で提供する。これを利用して、センサーやドローンなどのデバイスを、エージェントの協調機能を利用して、クラウドアプリケーションがデバイスと連携する^[68]。また、エージェントを利用して、自律的で頑健なセキュリティ機能を IoT 環境で実現する試みも行われている^[69]。さらに、海外との会議をマルチメディア環境で支援する IoT 型支援機能の開発も進められている^[70]。

ADIPS フレームワークは、IoT や深層学習の技術が発展する前に設計されたフレームワークなので、深層学習などの最近の AI の成果を利用するしくみが明示的に定義されていない。このため、ADIPS を、IoT パラダイムや深層学習・強化学習のパラダイムに対応する試みが現在進められている^[71]。これらの試みの一つとして、拡張された ADIPS フレームワークの Python 実装である MARS エージェントプラットフォームが試作され、マルチメディア型 IoT アプリケーションの開発が行われている。

6. おわりに

エージェント指向開発方法論の研究は、オブジェクト指向開発方法論に比べて注目すべき進展が見られていない。しかし、近年、IoT やインダストリアル・インターネットの技術の発展にともない、新しい自律的なシステムの開発方法論の必要性が指摘されている。その 1 つの候補として、エージェント指向開発方法論が再度注目されてきている。本稿では、この観点でエージェント技術のこれまでと今後について概観した。

参考文献

- [1] M. Weiser: "The Computer for the 21st Century," *Scientific american*, Vol.265, No.3, pp. 94-105, 1991.
- [2] K. Lyytinen and Y. Yoo: "Issues and Challenges in Ubiquitous Computing," *Communications of the ACM*, Vol.45, No.12, pp. 63-65, 2002.
- [3] K. Ashton: "That 'internet of things' thing," *RFID J.*, Vol.22, No.7, pp. 97-114, 2009.
- [4] W. Wolf: "Cyber-physical Systems," *IEEE Computer*, Vol.42, No.3, pp. 88-89, 2009.
- [5] 山川宏, 市瀬龍太郎: "汎用人工知能輪読会の発足とその後の活動 (汎用人工知能 (AGI) への招待)," *人工知能*, Vol.29, No.3, pp.265-267, 2014.
- [6] J. Q. Li, F. R. Yu, G. Deng, C. Luo, Z. Ming, and Q. Ming: "Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.19, No.3, pp. 1504-1526, 2017.
- [7] 八山幸司: "米国における IoT (モノのインターネット) に関する取り組みの現状," *ニューヨークだより*, JETRO, 8 月号, pp. 1-26, 2015.
- [8] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoff-

- mann: "Industry 4.0," *Business & Information Systems Engineering*, Vol.6, No.4, pp. 239-242, 2014.
- [9] J. Wan, S. Tang, Z. Shu, D. Li, S. Wang, M. Imran, and A. Vasilakos: "Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry4.0," *IEEE Sensors J.*, p. 1, doi: 10.1109/JSEN.2016.2565621, 2016.
- [10] 原辰次, 本田敏: "超スマート社会におけるシステム科学技術概論," 計測と制御, Vol.55, No.4, 2016.
- [11] 内林俊洋, 門間陽樹, 新城龍成, 久保孝嘉, 橋祐一, 加藤尚徳, 披田野清良, 菅沼拓夫, 樋地正浩, 橋本和夫, 清本晋作: "iKaaS—プライバシーに配慮した IoT プラットホーム—," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.101, No.1, pp. 3-15, 2018.
- [12] J. A. Stankovic: "Research Directions for the Internet of Things," *IEEE Internet of Things J.*, Vol.1, No.1, pp. 3-9, doi: 10.1109/JIOT.2014.2312291, 2014.
- [13] P. P. Ray: "A survey on Internet of Things architectures," 2016.
- [14] F. A. Alaba, M. Othman, I. A. T. Hashem, and F. Alotaibi: "Internet of Things security: A survey," 2017.
- [15] L. M. Vaquero, and L. Roderio-Merino: "Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.44, No.5. doi: 10.1145/2677046.2677052, 2014.
- [16] T. Suganuma, T. Oide, S. Kitagami, K. Sugawara, and N. Shiratori: "Multiagent-Based Flexible Edge Computing Architecture for IoT," *IEEE Network*, Vol.32, No.1, pp. 16-23. doi: 10.1109/MNET.2018.1700201, 2018.
- [17] マーヴィン・ミンスキー: "心の社会," 産業図書, 1990.
- [18] 石田亨: "エージェントを考える," 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp. 663-667, 1995.
- [19] M. Wooldridge, and N. R. Jennings: "Intelligent agents: Theory and practice," *The knowledge engineering review*, Vol.10, No.2, pp. 115-152, 1995.
- [20] 木下哲男, 菅原研次: "エージェント指向コンピューティング—エージェントの基礎と応用—," 1995.
- [21] Y. Shoham: "Agent-oriented programming," *Artificial Intelligence*, Vol.60, No.1, pp. 51-92, 1993.
- [22] 生天目章: "マルチエージェントと複雑系," 森北出版, 1998.
- [23] 服部宏充, 十見俊輔, 中島悠: "大規模マルチエージェントシミュレーションに基づく社会システムデザインの可能性," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J100-D, pp. 180-193, 2017.
- [24] S. Knox, P. Meier, J. Yoon, and J. J. Harou: "A python framework for multi-agent simulation of networked resource systems," *Environmental Modelling & Software*, Vol.103, pp. 16-28, 2018.
- [25] J. B. Soyez, G. Morvan, R. Merzouki, and D. Dupont: "Multilevel Agent-Based Modeling of System of Systems," *IEEE Systems J.*, Vol.11, No.4, pp. 2084-2095, 2017.
- [26] 河原達也: "音声対話システムの進化と淘汰: 歴史と最近の技術動," 人工知能学会誌, Vol.28, No.1, pp.45-51, 2013.
- [27] 山川宏, 我妻広明, 吉田倫子: "特別企画: 「シンギュラリティの時代: 人を超越ゆく知性とともに」にあたって," 人工知能学会誌, Vol.28, No.3, pp. 424-426, 2013.
- [28] S. Itazuro, T. Uchiya, T. Kinoshita, and I. Takumi: "Development Support of Learning Agent on Repository based Agent Framework," *Int. J. of Software Science and Computational Intelligence (IJSSCI)*, Vol.4, No.3, pp.62-79, 2012.
- [29] E. Al-Hashel, B. M. Balachandran, and D. Sharma: "A Comparison of Three Agent-Oriented Software Development Methodologies: ROADMAP, Prometheus, and MaSE," *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 909-916, 2007.
- [30] M. Wooldridge, N. R. Jennings, and D. Kinny: "The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design," *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol.3, No.3, pp. 285-312, doi: 10.1023/A:1010071910869, 2000.
- [31] 白鳥則郎, 木下哲男, 菅沼拓夫, 菅原研次, 藤田茂: "次世代ネットワークソフトウェアの構築に向けて," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.82, No.5, pp. 694-701, 1999.
- [32] N. R. Jennings: "An agent-based approach for building complex software systems," *Communications of the ACM*, Vol.44, No.4, pp. 35-41, 2001.
- [33] M. S. Kwang: "Agent-Based Cloud Computing," *IEEE Transactions on Services Computing*, Vol.5, No.4, pp. 564-577, doi: 10.1109/TSC.2011.52, 2012.
- [34] J. P. A. Barthès: "OMAS—a flexible multi-agent environment for CSCWD," *Future Generation Computer Systems*, Vol.27, No.1, pp. 78-87, 2011.
- [35] S. Poslad, P. Buckle, and R. Hadingham: "The FIPA-OS agent platform: Open source for open standards," *Proc. of the 5th Int. Conf. and exhibition on the practical application of intelligent agents and multi-agents*, Vol.355, p.368, 2000.
- [36] N. Howden, R. Rönquist, A. Hodgson, and A. Lucas: "JACK intelligent agents—summary of an agent infrastructure," *Management*, doi: 10.1.1.133.8934, 2001.
- [37] F. Bellifemine, A. Poggi, and G. Rimassa: "JADE-A FIPA-compliant agent framework," *Proceedings of PAAM*, Vol.99, No. 97-108, p.33, 1999.
- [38] H. F. Ahmad and H. Suguri: "Suguri Scalable fault tolerant agent grooming environment: Sage," *Proc. of the fourth Int. joint Conf. on Autonomous agents and multiagent systems*, pp. 125-126, 2005.
- [39] H. S. N. wana, D. T. Ndumu, and L. C. Lee: "An advanced tool-kit for engineering distributed multi-agent systems," *Proc. of PAAM*, Vol.98, pp. 377-391, 1998.
- [40] 川村隆浩, 田原康之, 長谷川哲夫, 大須賀昭彦, 本位田真一: "Bee-gent: 移動型仲介エージェントによる既存システムの柔軟な活用を目的としたマルチエージェントフレームワーク," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.82, No.9, pp. 1165-1180, 1999.
- [41] G. Zhong, K. Takahashi, T. Helmy, K. Takaki, T. Mine, S. Kusakabe, and M. Amamiya: "As a distributed multi-agent system," *Parallel and Distributed Systems: Workshops, Seventh Int. Conf. on, 2000*, IEEE, pp. 435-440, 2000.
- [42] T. Kinoshita, and K. Sugawara: "ADIPS Framework for Flexible Distributed Systems," *Pacific Rim Int. Work-*

- shop on Multi-Agents*, pp. 18-32, 1998.
- [43] T. Uchiya, T. Maemura, H. Hara, and T. Kinoshita: "Interactive design method of agent system for symbiotic computing," *Cognitive Informatics, 6th IEEE Int. Conf. on*, pp. 312-320, 2007.
 - [44] R. H. Bordini, J. F. Hübner, and M. Wooldridge: "Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason," Vol.8, 2007.
 - [45] A. Helsing, M. Thome, and T. Wright: "A Scalable, Distributed Multi-Agent Architecture," *IEEE*, doi10.1109/ICSMC.2004.1399959, 2004.
 - [46] P. T. Eugster, P. A. Felber, R. Guerraoui, and A. M. Kermarrec: "The many faces of publish/subscribe," *ACM Computing Surveys*, Vol.35, No.2, pp. 114-131, 2003.
 - [47] R. E. フィルマン, D. P. フリードマン: "協調型計算システム-分散型ソフトウェアの技法と道具立て-", マグロウヒル, 1986.
 - [48] C. Hewitt, P. Bishop, and R. Steiger: "A Universal Modular ACTOR Formalism for Artificial Intelligence," *Proc. IJCAI'73 Proc. of the 3rd Int. joint Conf. on Artificial intelligence*, doi10.1145/359545.359563, 1973.
 - [49] M. Wooldridge and P. Ciancarini: "Agent-oriented software engineering: the state of the art," *First Int. workshop, AOSE 2000 on Agent-oriented software engineering*, pp. 1-28, 2001.
 - [50] O. Boissier, R. H. Bordini, J. F. Hübner, A. Ricci, and A. Santi: "Multi-agent oriented programming with JaCaMo," *Science of Computer Programming*, Vol.78, No.6, pp. 747-761, doi: 10.1016/J.SCICO.2011.10.004, 2013.
 - [51] S. Rodriguez, N. Gaud, and S. Galland: "SARL: a general-purpose agent-oriented programming language," *the 2014 IEEE/WIC/ACM Int. Conf. on Intelligent Agent Technology*, Warsaw, 2014.
 - [52] P. G. Lopez, A. Montresor, D. Epema, A. Datta, T. Higashino, A. Iamnitchi, M. Barcellos, P. Felber, and E. Riviere: "Edge-centric computing: Vision and challenges," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.45, No.5, pp. 37-42, 2015.
 - [53] 白鳥則郎, 北上真二, 菅沼拓夫, 菅原研次, 嶋本薫: "IoT アーキテクチャの最新動向," 電子情報通信学会誌 = *The j. of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Vol.100, No.3, pp. 214-221, 2017.
 - [54] S. Wrede, O. Beyer, C. Dreyer, M. Wojtynek, and J. Steil: "Vertical Integration and Service Orchestration for Modular Production Systems using Business Process Models," *Procedia Technology*, Vol.26, pp. 259-266, 2016.
 - [55] W. He and L. D. Xu: "Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol.10, No.1, pp. 35-42, 2014.
 - [56] G. Fortino: "Agent Meet the IoT," *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, Vol.2, No.2, pp. 43-47, 2016.
 - [57] M. A. Razzaque, M. Milojevic Jevric, A. Palade, and S. Clarke: "Middleware for Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet of Things J.*, Vol.3, No.1, pp. 70-95, doi: 10.1109/IIOT.2015.2498900, 2016.
 - [58] F. Bergenti, E. Iotti, S. Monica, and A. Poggi: "Agent-oriented model-driven development for JADE with the JADEL programming language," *Computer Languages, Systems & Structures*, Vol.50, pp. 142-158, 2017.
 - [59] Y. Kwon, S. Sundresh, K. Mechitov, and G. Agha: "ActorNet: an actor platform for wireless sensor networks," *Proc. of the 5th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '06)*, doi: 10.1145/1160633.1160871, 2006.
 - [60] C. L. Fok, G. C. Roman, and C. Lu: "Agilla: A mobile agent middleware for self-adaptive wireless sensor networks," *ACM Trans. on Autonomous and Adaptive Systems*, Vol.4, No.3, pp. 1-26, doi: 10.1145/1552297.1552299, 2009.
 - [61] T. Kinoshita, K. Sugawara, and N. Shiratori: "Agent-based Framework for Developing Distributed Systems," *Proc. CIKM'95 Workshop on Intell. Info. Agent*, 1995.
 - [62] T. Uchiya, T. Maemura, H. Hara, K. Sugawara, and T. Kinoshita: "Interactive Design Method of Agent System for Symbiotic Computing," *Int. J. Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, Vol.3, No.1, pp. 57-74, 2009.
 - [63] T. Uchiya, Y. Nakashima, I. Takumi, T. Kinoshita, H. Hara, and K. Sugawara: "Repository-centered Agent Organization Method among Heterogeneous Agent Platforms," *Int. J. Energy, Information and Communication*, Vol.2, No.4, pp. 47-66, 2011.
 - [64] B. Li and T. Kinoshita: "Active Support for Using Academic Information Resource in Distributed Environment," *Int. J. Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, Vol.7, No.6, pp. 69-73, 2007.
 - [65] T. Kinoshita: "Agent-Based Active Information Resource and Its Applications," *Databases in Networked Information Systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 143-156, 2010.
 - [66] 顧優輝, 眞部雄介, 菅原研次: "現実空間とデジタル空間の情報リソースをエージェントと接続するためのエージェントプラットフォームの開発," 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.1, pp. 284-294, 2015.
 - [67] Y. Kaeri, C. Moulin, K. Sugawara, and Y. Manabe: "Agent-based System Architecture Supporting Remote Collaboration via an Internet of Multimedia Things Approach," *IEEE ACCES*, Vol.6, No.1, pp. 17067-17079, 2018.
 - [68] T. Ito, Y. Kurita, H. Takahashi, K. Sasai, G. Kitagata, and T. Kinoshita: "A Cooperative Multi-agent System Infrastructure for Heterogeneous Sensor Environment," *Int. J. Energy, Information and Communications*, Vol.4, No.2, pp. 55-70, 2013.
 - [69] T. Kato, H. Takahashi, and T. Kinoshita: "Multiagent-based Autonomic and Resilient Service Provisioning Architecture for the Internet of Things," *Int. J. Computer Science and Network Security*, Vol.17, No.6, pp. 36-58, 2017.
 - [70] C. Moulin, Y. Kaeri, K. Sugawara, and M. H. Abel: "Capitalization of remote collaborative brainstorming activities," *Computer Standards & Interfaces*, Vol.48, pp. 217-224, doi: 10.1016/j.csi.2015.11.006, 2016.
 - [71] K. Watanabe, T. Uchiya, I. Takumi, and T. Kinoshita: "Development Support Mechanism for Deep Learning

Agent on DASH Agent Framework,” *11th Int. Conf. on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*, pp. 526-534, 2017.

(2018 年 4 月 16 日 受付)

[問い合わせ先]

〒105-0001 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

千葉工業大学情報科学部 7 号館 5F 第 6 研究室

菅原真部研究室

菅原 研次

E-mail: suga@net.it-chiba.ac.jp

—— 著 者 紹 介 ——

すがわら けんじ
菅原 研次 [非会員]

1977 年東北大学大学院修士課程修了。1980 年千葉工業大学助手。現在、千葉工業大学情報科学部情報ネットワーク学科教授。工学博士。1994 年情報処理学会山下記念賞。1996 年情報処理学会論文賞。2000 年電子情報通信学会業績賞。2008 年電子情報通信学会フェロー。

きのした てつお
木下 哲男 [非会員]

1979 年東北大学大学院修士課程修了。同年沖電気工業(株)入社。1996 年東北大学電気通信研究所助教授。現在、同教授。工博。電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、IEEE、ACM、AAAI 各会員。

かえり ゆうき
顧 優輝 [非会員]

2018 年千葉工業大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。目白大学メディア学部メディア学科助教。マルチエージェントシステムに関する研究に従事。情報処理学会、IEEE 各会員。