

トレンド

CPSの実現に向かう ロボット技術の高度化と実用化

Efforts Aimed at Sophistication and Practical Realization of Robot Technologies Needed for Cyber-Physical Systems

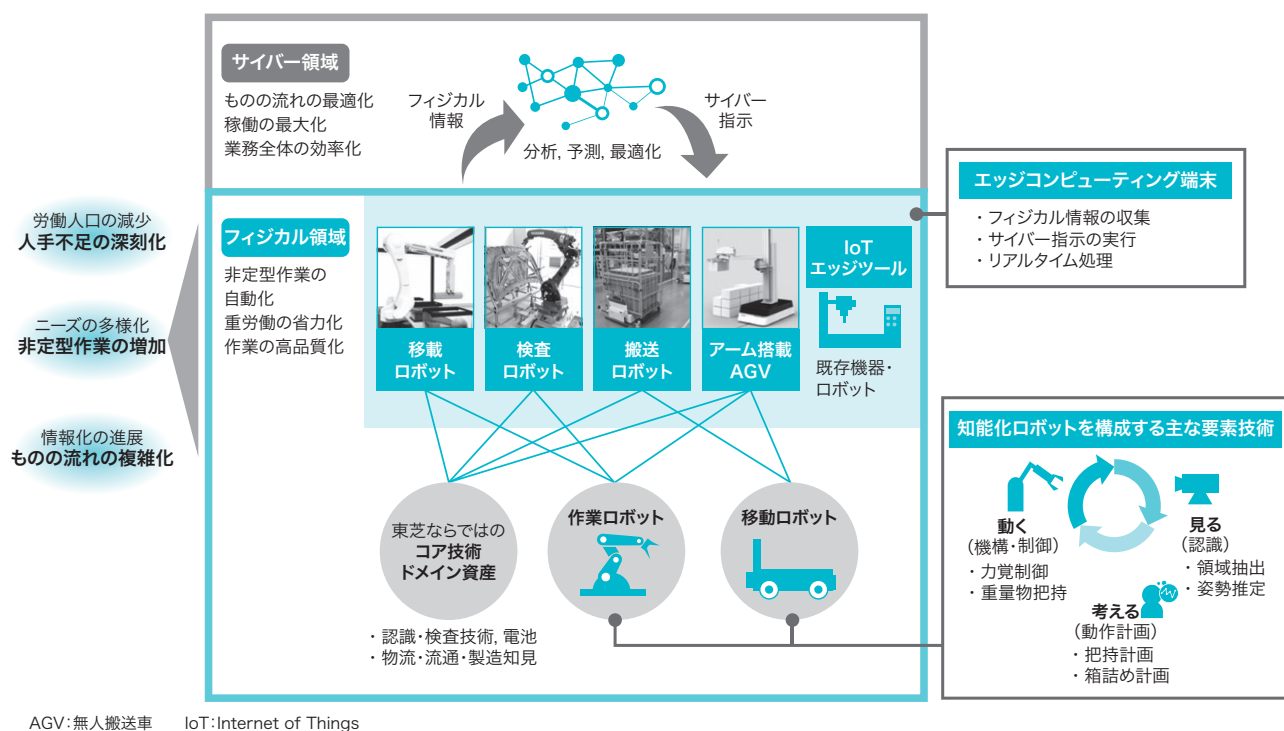
宮内 孝 MIYAUCHI Takashi 近藤 浩一 KONDO Koichi 山本 健彦 YAMAMOTO Takehiko 山本 宏 YAMAMOTO Hiroshi

少子高齢化などの社会構造の変化に伴う人手不足の深刻化、及び作業内容の多様化・複雑化に応えるため、ロボットや自動化機器には、従来のような定型的な繰り返し作業に加え、周囲環境や作業内容に応じて柔軟に判断し、自律的に働くことが、期待されている。

これまで、東芝グループは、各種のロボットや自動化機器を開発し、様々な形で社会や市場のニーズに応えてきた。また、人手不足や作業内容の多様化・複雑化に対応するため、個々のロボットの知能化・高度化に加え、ロボットをCPS（サイバーフィジカルシステム）のエッジコンピューティング端末とすることで、これまでの単体機器では成し得なかった価値創出を実現し、様々な顧客に自動化ソリューションとして提供していく。

Accompanying the growing labor shortage due to the change in the population structure as a consequence of the declining birthrate and aging of society as well as the further diversification and complexity of work, there is a strong need for robots and automated equipment that can perform autonomous operations responding flexibly to the surrounding environment and work requirements in addition to the conventional forms of repetitive work.

The Toshiba Group has been developing many different varieties of robots and automated equipment to meet the needs of society and the market. We are also promoting not only the research and development of more intelligent and advanced technologies for individual robots but also the creation of new value, which has not been able to be achieved independently up to now, by connecting them to cyber-physical systems (CPS) as devices for edge computing aimed at providing automation solutions to a wide range of customers.



特集の概要図。CPSのエッジコンピューティング端末として強みを発揮する東芝グループの知能化ロボット

Advantages provided by Toshiba intelligent robots as edge computing devices for CPS

1. まえがき

我が国では、少子高齢化や就業人口の減少が進むとともに、“きつい”、“汚い”、“危険”のいわゆる3K職場を回避する傾向が高まっており、多くの産業で、人材確保が一層厳しくなっている。そこで、このような人手不足への対策として、自動化機器やロボットの導入による自動化と省人化が、今まで以上に期待されている⁽¹⁾。

一方で、製造、流通、物流など、各産業へのニーズの変化に伴い、現場での作業内容の変化が進んでいる。例えば、製造業においては、多様化する顧客ニーズに応じた製品やサービスを展開していくことが求められている⁽¹⁾。また、流通業においては、消費者の購買行動の変化に伴う業務の複雑化が見られる⁽²⁾。物流業においては、eコマース（電子商取引）の拡大に伴う物流ニーズの多様化により、輸送の小口化・多頻度化が進んでいる⁽³⁾。これらの結果、従来のように定型的に同じ内容を繰り返す作業に加え、周囲の環境や作業内容に応じて個別に判断して対応する、非定型な作業も増えており、このような作業を柔軟に実行する知能化ロボットが、求められている。

東芝グループは、これまで、各種のロボットや自動化機器を開発し、様々な形で社会に貢献してきた。これに対し、前述した人手不足や、作業内容の多様化・複雑化などに対応するためには、個々のロボットや自動化機器の知能化・高度化に加え、ロボットをシステムとしてつなぐことで、今までの単体機器では成し遂げられなかった価値を創出することが期待されている。

ここでは、東芝グループが今まで提供してきたロボットや自動化機器を振り返るとともに、ロボットをCPSのエッジコンピューティング（エッジ処理）端末としてつなぐことで実現する、新たな価値創出の方向性について述べる（**特集の概要図**）。また、ロボット技術の高度化とそれらの技術をインテグレートして開発したロボットについて述べる。

2. 東芝グループのロボット開発の歴史

創業以来、およそ140年にわたってものづくりを続けてきた東芝グループは、社会課題の解決に向け、各種のロボットや自動化機器の開発に取り組んできた（**図1**）。人々の生活を豊かにするロボットとしては、東芝グループ創業者の一人であり、“からくり儀右衛門”と呼ばれた田中久重が、1820年代に、自ら矢を弓につがえて的を射するという、人間と同じ高度な動きをする“弓曳童子（ゆみひきどうじ）”を製作した⁽⁴⁾（**図1(a)**）。近年では、画像や音声認識技術を生かし、人を認識し追従して移動する“お供ロボット”と、複数

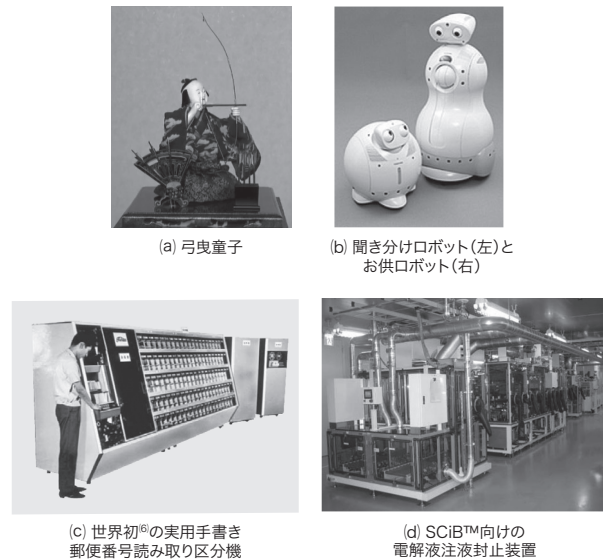


図1. 東芝グループのロボット開発の歴史

創業以来およそ140年にわたり、社会課題の解決に向けて、各種のロボットや自動化機器の開発に取り組んできた。

History of Toshiba's robot development

の人の声を同時に聞き分ける“聞き分けロボット”を開発し、2005年日本国際博覧会（愛知万博）に出展した⁽⁵⁾（**図1(b)**）。また、産業分野で貢献している事例としては、郵便物を高速に仕分ける郵便区分機（**図1(c)**）⁽⁶⁾や鉄道の駅で使われている自動改札機などの自動化機器が挙げられる。これらの機器では、紙送り技術と画像認識技術により、高速・高精度の処理を実現している。更に、ものづくりに関する領域では、東芝製リチウムイオン二次電池SCiB™向けの電解液注液封止装置（**図1(d)**）⁽⁷⁾やハードディスクドライブの組立装置⁽⁸⁾など、製品の品質を左右する工程の製造設備を開発し、製造拠点で活用している⁽⁹⁾。

最近では、ロボット開発を加速するために、各種のコンテストが行われている。東芝グループも、技術レベルの確認と開発の加速を目的に、Amazon Robotics Challenge 2017やWorld Robot Summit 2018のWorld Robot Challenge（WRC2018）などの国際ロボット競技会に参加した。WRC2018では、サービスカテゴリーのフューチャーコンビニエンスストアチャレンジで総合優勝を収め、経済産業大臣賞を受賞した（**図2**）。東芝グループは、ロボットプラットフォーム技術を活用することで、安定して動作するロボットを短期間で開発している。

このように、東芝グループは、ロボットや自動化機器に関する技術開発を継続的に進めてきた。これからも、新しい技術を開発し、実用化することで社会課題の解決に貢献していく。

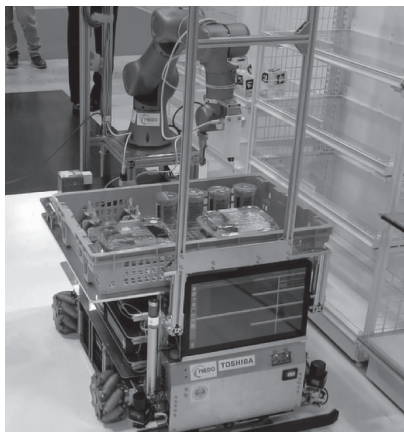


図2. 国際ロボット競技会での技術レベルの確認

WRC2018におけるサービスカテゴリーのフューチャーコンビニエンスストアチャレンジ(商品陳列や廃棄物回収作業を行う)で、総合優勝を収めた。

Participation in robot contests including World Robot Challenge (WRC)

3. エッジコンピューティング端末としてのロボットの役割

知能化ロボットが周囲の環境変化に対応しながら多様な作業を柔軟に実行するために、主に三つの要素技術が重要になる。これらは、外界の状況を正確に認識する“認識技術”，周囲との干渉回避や把持方法など必要な作業を確実に行う“計画技術”，及び周囲の変化や誤差を吸収しながら柔軟に作業を実行する“機構・制御技術”である。そして、これらの技術で実現されるそれぞれの機能をインテグレートすることで、ロボットが構成される。特に、4章で述べるような知能化が進んだロボットは、認識、計画、及び機構・制御のループを内部に持っており、現実世界の情報を処理することで現実世界のアクションにつなげるCPS(サイバーフィジカルシステム)と捉えることができる。

更に、知能化ロボットを上位系とつなぐことで、新たなCPSを構築することができる。図3に示すように、現実世界の様々な情報をクラウドシステムなどに集積し、それらを高度に処理することで現実世界のアクションにつなげる仕組みである。CPSとしてのロボットとそれを包括する上位のCPSが、互いに連携して進化する関係にある。このような上位のCPSでは、現実世界の近くで行われる情報収集とアクション実行の処理をエッジコンピューティングと呼んでおり、知能化ロボットがこの役割の一部を担うことが期待されている。このように、ロボットには、複雑な処理を高度に連携して柔軟な作業を行う知能化システムとしての完成度と、CPSのエッジコンピューティング端末として上位系と連携するイン

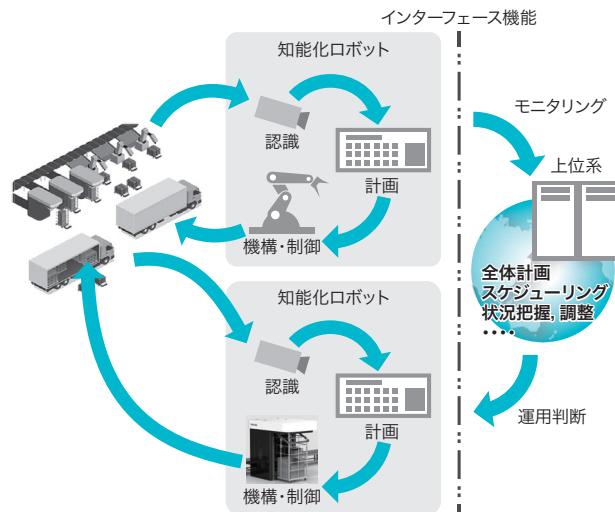


図3. CPSにおけるロボット機能の拡大

ロボットには、エッジコンピューティング端末の役割を担うことで、現実世界の正確なフィジカル情報を収集すること、現実世界へのアクションを的確に実行することが期待されている。

Expansion of robot functions in CPS

ターフェース機能が求められる。

物流倉庫を例にとると、個々のロボットは、実際にハンドリングする荷物の種類や配置などを認識し、移動や把持の手順を計画して作業を実行する。一方、倉庫全体を制御する上位系は、個々のロボットの扱った荷物の種類や数量のデータを収集することで、倉庫全体の状況を把握でき、更に、それに基づいて全体の作業計画を作成できる。また、個別のロボットの稼働状況をモニタリングすることで、ロボットの効率的な運用につなげるなどの効果も期待できる。

このような複雑な情報処理のループを階層的に実行するためには、情報処理の枠組みとして論理的なアーキテクチャーを階層ごとに定義し、それに基づき具体的にシステムを実装していくことが望ましい。個々のロボットが準拠すべきアーキテクチャーは、ロボットの機能を踏まえた上でのエッジコンピューティングのアーキテクチャーである。上位系は、データ収集や、データ分析、サービス連携などに適したCPSの視点でのIoT(Internet of Things)アプリケーションのアーキテクチャーに基づいている。ロボット向けのエッジコンピューティングアーキテクチャーについては、東芝グループは、作業ロボットや移動ロボットのために、新しい価値の作り込みと高い開発効率を実現するアーキテクチャーを定義した(この特集のp.16-19参照)。また、IoT向けのアーキテクチャーとしては、データの流れと処理、それらを活用したサービスの連携を念頭に、IoTリファレンスアーキテクチャーとして整理している。

図4は、東芝グループの提唱するIoTリファレンスアーキテクチャーである。智能化ロボットが担うのはEdge（エッジ）領域で、ロボットや周辺の機器から得られるデータをPlatform（プラットフォーム）領域のData（データ）機能ブロックに格納する。自動倉庫や物流システムなどの計画や最適化計算は、これらのデータを使ってAnalytics（アナリティクス）機能ブロックで実行され、Operations（操作）機能ブロックを経由して個別のロボットや機器に命令が送られる。エッジ領域とプラットフォーム領域の連携による情報処理ループは、自動倉庫の機器群の最適な運用制御であり、図3で示した情報処理のループに対応する。ここで得られたデータを、更に上位のシステムに提供し、ほかの様々なシステムと連携することで、データに基づいた新たな機能やサービスを実現できる可能性がある。Enterprise Service（エンタープライズサービス）領域は、このようなシステム連携やサービス提供をつかさどる。

ここで述べたように、物流や製造などの高度な自動化を実現する智能化ロボットは、CPSを実現するための高度なエッジコンピューティング端末の代表例と考えられる。東芝

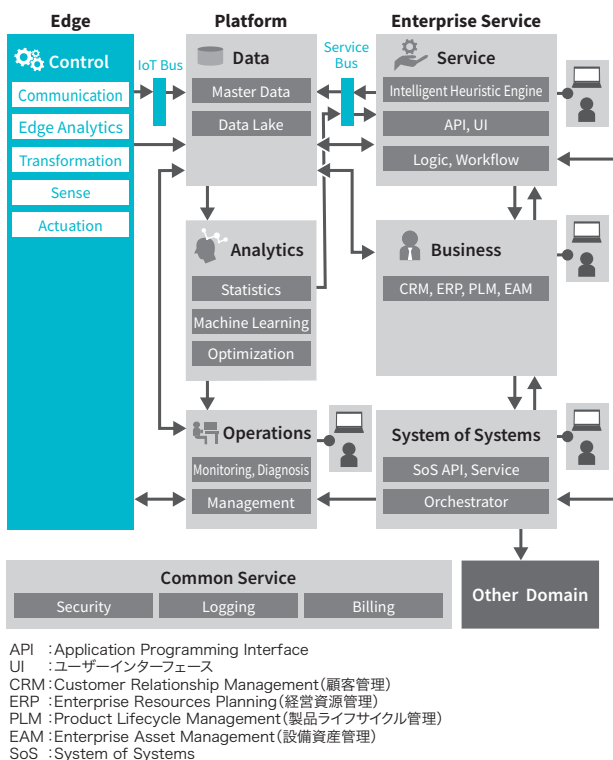


図4. 東芝IoTリファレンスアーキテクチャーの構成

国際的標準を基にしたアーキテクチャーであり、智能化ロボットが担うのはEdge領域である。ロボットは、データをデータ機能ブロックに格納するとともに、操作機能ブロックを経由して、アナリティクス機能ブロックからの命令を受ける。

Configuration of Toshiba IoT Reference Architecture

グループは、智能化ロボットのCPSへの導入とIoTソリューションへの展開を念頭に、研究開発を推進していく。

4. 要素技術の高度化とロボット開発

この章では、ロボットに必要な認識、計画、機構・制御、及び安全設計について、東芝グループが開発している技術について述べる。そして、社会ニーズに応えるために、これらの技術をインテグレートすることで開発を進めている各種のロボットについて、更に、CPSにつなげるためのロボットのIoT化の取り組みについて述べる。

4.1 要素技術の高度化

(1) 認識技術（見る） ロボットの“目”に相当する認識技術の開発に取り組んでいる。ロボットが物体を正しく把持したり、位置や姿勢を調整したりするためには、物体の形状や特徴を把握することが必要である。そこで現在、複数の物体が含まれる画像から、物体の領域を推定する技術を開発している。一般には、物体の種類ごとに学習する必要があるが、この技術には、図5に示すように、学習していない未知の種類のものである物体にも対応できる特長がある（この特集のp.8-11参照）。

(2) 計画技術（考える） ロボットの“脳”に相当する、動作計画を生成する技術の開発に取り組んでいる。人間はものを運ぶとき、周りにぶつからないような経路を選び、壊れやすいものであればゆっくり動かすなどの処理を、自然に身に着けている。ロボットにこのような動きをさせるためには、ロボットのコントローラーに、状況に応じて動作を変えるアルゴリズムを搭載する必要がある。そこで、図6に示すような、物品をつかむための動作計画である把持計画の生成技術や、所望の場所に荷物を詰めるための箱詰め動作計画の生成技術を開発

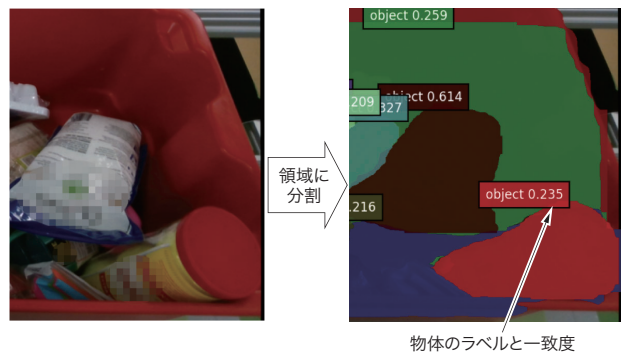


図5. 複数の物体から成る画像中の物体の領域抽出技術

ロボットの目に相当する認識技術であり、物体の種類ごとの学習をせずに、学習していない未知の種類のものである物体にも対応できる。

Technique for object region segmentation in image data

動作計画生成アルゴリズム

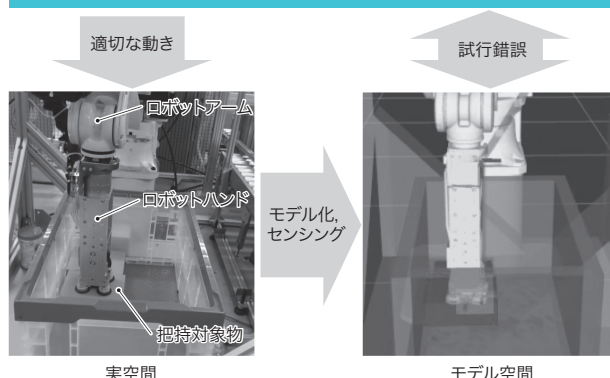
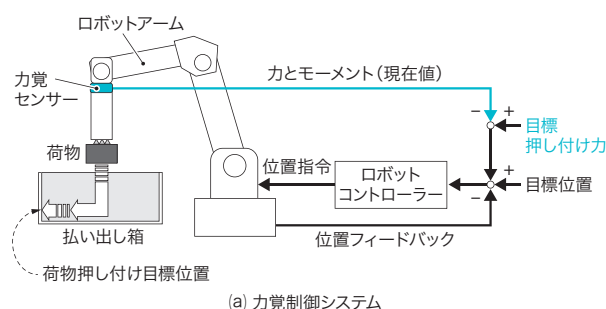


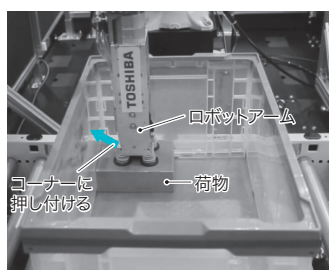
図6. 動作計画生成の流れ

ロボットの脳に相当するのが動作計画を生成する技術であり、モデル空間内で様々な動きを試行錯誤することで、適切な動きを決定する。

Flow of motion plan generation processes



(a) 力覚制御システム



(b) 箱詰め作業への適用

図7. 各種制御技術によるロボット動作の高度化

ロボットの手や足に相当するのが機構・制御技術であり、力覚制御の適用で、荷物を箱に隙間なく詰め込むことができる。

Improvement of robot motion using advanced control techniques

しており、物流現場で多様な物品を扱うロボットへの搭載を進めている（同p.20-24参照）。

- (3) 機構・制御技術（動く） ロボットの“手や足”に相当するのが機構と制御である。動作計画に基づき、アクチュエーターを用いてアームなどの機構を動かす。人間の腕のような滑らかな動きを実現する軌跡制御や、図7のように、物体を押すときの反力をセンシングする

ことで器用な動きを実現する力覚制御技術を開発し、各種ロボットに搭載している（同p.12-15参照）。

- (4) 安全設計技術（人を守る） 知能化ロボットは、従来よりも人間と同一の空間で作業する必要性が高まっているので、安全を確保するための技術が重要になる。そこで、以下の三つの原則を基本として、ロボットの安全確保に取り組んでいる。

- (a) 本質安全の原則 機械の危険源を除去する。
例えば、角部を丸くする。
(b) 隔離の原則 機械の危険源に接近することを防止する。例えば、柵や囲いを設ける。
(c) 停止の原則 人が機械の動作範囲に入る場合は、機械を停止する。

これら三つの原則に従った安全なロボットを提供するために、システムの構成方法や、各機器の選定方法と評価方法などの安全設計技術を開発している（同p.33-36参照）。

4.2 社会ニーズに応えるロボットの開発

- (1) 搬送作業ロボット 搬送作業は、製造、流通、物流の多くの現場で人手に頼っている作業である。これまで、コンベヤーやクレーンなどの搬送機器は使われていたが、近年は、製品や目的に合わせ、様々な搬送対象物を自律的に搬送するロボットが求められている。4.1節の(2)で説明した箱詰め動作計画の生成技術は、物流現場で多様な物品を扱うロボットへの搭載を進めている（同p.20-24参照）。また、従来のロボットのような、テープなどのマーカーやガイドなしに自律的に移動する自律搬送ロボットや、搬送ロボットの技術を生かして広い範囲を移動しながら監視するロボットの開発も進めている（同p.29-32参照）。更に、搬送ロボット上にロボットアームを搭載することで、様々な場所で荷積み作業を行うパレタイズロボットも開発している（同p.33-36参照）。

- (2) 検査作業ロボット 製造現場を中心に、人手を減らしにくい作業として検査作業があるが、各種のセンサーを用いた自動検査システムが提案され、製品化されている。多くの場合、検査を行うためにはセンサーを対象箇所近づける必要がある。検査のセンサー部やデータ処理が自動化されていても、センサーと対象物の位置調整を手で実施しては、省人効果は少ない。これに対しては、多関節ロボットを用いてセンサーを適切な位置に動かすことで、人手作業を自動化することができる。現在、超音波検査技術とロボット制御技術を組み合わせ、溶接部の検査を自動で行うロボッ

トを開発し、展開を進めている（同p.25-28参照）。

- (3) ロボット、自動化機器のIoT化 CPSのエッジコンピューティング端末としてロボットを活用するには、フィジカル情報を収集する仕組みが必要である。CPSの実現を加速するために、新規のロボットや自動化機器だけでなく、既に稼働しているロボットからも必要なデータを収集できる、後付けのセンシング機器を開発している。これらの機器は、様々な既存センサーと接続する機能や、デジタル化されていないメーターをカメラで撮像して数値化する機能を持っており、これらを使うことで、データ収集を短時間に開始できるようになる。これらの機器は、東芝グループ内の製造拠点で活用され、生産性向上に寄与している（同p.37-41参照）。

5. 今後の展望

あらゆる産業で人手不足の深刻さは増しており、その対策の一つとして、これまで使われていなかった分野へのロボットや自動化機器の導入が求められている。

東芝グループは、これまでも、様々なロボットや自動化機器を開発し、現場に投入してきた。今後も、周囲環境の変化に対応しながら多様な作業を柔軟に実行する知能化ロボットを実用化し、CPSのエッジコンピューティング端末としての役割を果たせるようにすることで、社会課題の解決に貢献していく。

将来は、このような知能化が進んだ複数のロボットを効率良く運営するオーケストレーションの重要性が増していくと考えられる。オーケストレーションとは、オーケストラの指揮者が、自律したそれぞれの奏者の特性を引き出して生きた音楽を創り上げるように、自律的な複数要素を有機的にまとめ上げることを指した言葉である。知能化ロボットの開発で培った技術を、上位のオーケストレーションのレイヤーに展開することで、幅広くソリューションを提供していく。

文 献

- (1) 経済産業省、ほか、「我が国製造業の足下の状況」、2017年版ものづくり白書（PDF版）、経済産業省、2017、p.24-28、<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun_pdf/pdf/honbun01_01_01.pdf>。（参照 2019-03-06）。
- (2) 経済産業省、ほか、「総合物流施策大綱策定の意義」、総合物流施策大綱（2017年度～2020年度）本文、経済産業省、2017、p.1-3、<<http://www.meti.go.jp/press/2017/07/20170728002/20170728002-2.pdf>>。（参照 2019-03-06）。
- (3) 青山繁弘、日本の流通 課題と展望 2017、流研オピニオン：コラム、流通経済研究所、2017、p.1-2、<<http://www.dei.or.jp/opinion/column/170106.pdf>>。（参照 2019-03-06）。
- (4) 東芝、見て、考えて、動く！ 受け継がれるロボットづくりのDNA、Toshiba Clip 世の中×東芝のトレンドを紹介、<<https://www.toshiba-clip.com/detail/6405>>。（参照 2019-03-06）。
- (5) 松日楽信人、ほか、人と共存する生活支援ロボット、東芝レビュー、2005、60、7、p.112-115。
- (6) 小島秀隆、山本健彦、郵便・物流自動化システムの技術動向と東芝の取組み、東芝レビュー、2015、70、4、p.2-5。
- (7) 東芝、リチウムイオン二次電池SCiB™の増産設備投資用装置、生産技術トピックス：2017年、<<http://cmc.toshiba.co.jp/cmc/topics/tech/2017.htm>>。（参照 2019-03-06）。
- (8) 東芝、0.85インチHDD組立自動化ライン、生産技術トピックス：2010年以前、<<http://cmc.toshiba.co.jp/cmc/topics/tech/2010.htm>>。（参照 2019-03-06）。
- (9) 宮内 孝、ほか、製造工程の特性に応じた自動化機器・製造設備の適用による合理化、東芝レビュー、2018、73、1、p.11-15、<https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2018/01/73_01pdf/a04.pdf>。（参照 2019-03-06）。



宮内 孝 MIYAUCHI Takashi
研究開発本部 生産技術センター
日本機械学会会員
Cooperate Manufacturing Engineering Center



近藤 浩一 KONDO Koichi, D.Eng.
東芝インフラシステムズ（株）インフラシステム技術開発センター
博士（工学） 日本機械学会・精密工学会・情報処理学会・
Association for Computing Machinery 会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



山本 健彦 YAMAMOTO Takehiko
東芝インフラシステムズ（株）
情報処理学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



山本 宏 YAMAMOTO Hiroshi
デジタルイノベーションテクノロジーセンター
Digital Innovation Technology Center