



5章

## 製造業分野への応用

～高速大容量通信による産業用ロボット制御の高度化～

池永全志<sup>†</sup>, 西田 健<sup>†,††</sup>

キーワード：産業用ロボット、3次元計測センサ、FAシステム、第5世代移動通信システム

### 1. まえがき

高速大容量、低遅延の無線通信を実現する5G技術の実用化により、高精細映像伝送、大容量センサデータ転送、リアルタイム制御信号伝送等が可能になり、さまざまな領域において、新しいサービスの開発やこれまでにない機能が実現されると期待されている。その一つが製造業分野への適用による生産現場の高度化であり、5Gによる信頼性の高い無線通信がFA (Factory Automation) の進化を加速し、「つながる工場」(Connected Industries) を実現する重要な役割を果たすことになると考えられる。

製造業分野における生産性の向上や省人化などを目的とした生産現場の高度化に向けて、産業用ロボットや自動機械の導入が模索されており<sup>1)</sup>、関連する高度な技術の開発や低価格化の取り組みが進められている。なかでも産業用ロボットは、正確かつ高速な動作が可能であることから、単純な繰り返し作業が必要な領域において利用されている。しかし、一般的な産業用ロボットの構成ではロボットとロボットを制御するコントローラおよび外部機器等の複数の装置が専用の通信線で接続されており、また、設置環境やロボットの動作内容に応じてプログラミング(教示、ティーチング)作業が必要であるため、設置から稼働までの作業工程が長く複雑になるという問題がある。少量多品種の生産が求められる現在の製造現場においては、生産ラインの組み替えや製造工程の変更が頻繁に必要になっており、産業用ロボットを含む各種機器を再配置して生産を開始するまでの生産準備時間をできる限り短縮するために、迅速な配置換えが可能な仕組みが求められている。

そこで、製造現場における各種機器間の通信を無線化することによって既存設備への新しい機器の導入、迅速なメンテナンスの実施、レイアウト変更時のリードタイム短縮

を目指す取り組みが進んでおり、これまでに無線LANやISA100、IEEE802.11 ah等のさまざまな無線通信規格が検討されている<sup>2)~4)</sup>。また、工場内部で使用する多様な無線通信システムを安定して使用するために、フレキシブルファクトリパートナーアライアンス (FFPA) によって、SRF無線プラットフォーム<sup>5)</sup>なども提案されている。このような取り組みに加えて、高速大容量・低遅延・同時多接続を可能にする第5世代移動通信システム (5G) を工場における無線通信に利用する検討も始まっており<sup>6)~8)</sup>、無線通信に対して比較的厳しい工場内の環境において、干渉が少なく、高品質な通信が実現できるものと期待されている。

本稿では、5G無線通信を使用したFAシステムの実証モデルとして、産業用ロボットと3次元計測センサによって構成されるピックアンドプレースシステムを構築し、実際の製造現場である工場における28GHz帯の5G通信システムを用いた動作検証および迅速な配置換えの実証を行った結果について報告する。

### 2. 産業用ロボットシステムの無線化

代表的なシステム構成として、3次元計測センサを用いて計測したデータに基づいて、産業用ロボットが対象物の把持・搬送・解放を行うピックアンドプレース処理を例にとると、各機器間で必要な通信を無線化する方法としては主に図1に示す二つのパターンが考えられる。

パターン1は、3次元計測センサと産業用ロボットを一体化して構成するものである。この形態であれば移動や設置は容易であるが、センサとロボットの構成に自由度がなく、複数のロボット等との組合せを柔軟に変更することが困難である。パターン2は、センサとロボットを個別に無線化し、それぞれを移動可能にする構成である。無線端末装置がセンサとロボットに必要となるが、センサと複数のロボットの組合せや配置を柔軟に変更することが可能であり、無線化の利点を最大限に活かすことが可能である。ただし、どちらのパターンであっても、単に機器間の通信を無線化するだけでは配置換えに伴うリードタイム短縮には不十分であり、ロボット制御システム全体の高度化が必要

<sup>†</sup> 九州工業大学大学院工学研究院

<sup>††</sup> KiQ Robotics株式会社

"Application of 5G Mobile Communication Systems to the Manufacturing Industry" by Takeshi Ikenaga (Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka) and Takeshi Nishida (Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka/KiQ Robotics Inc., Fukuoka)

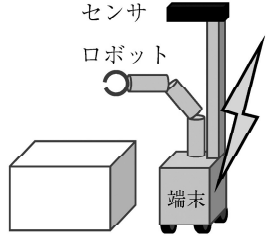
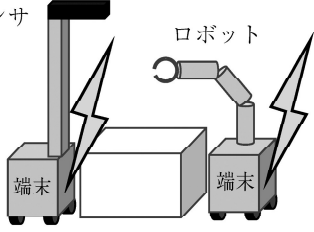
	ロボットとセンサを ひとつの筐体にまとめて無線化	ロボットとセンサをそれぞれ無線化
概要	<p>&lt;パターン 1&gt;</p> 	<p>&lt;パターン 2&gt;</p> 
設置	ロボットとセンサが1台にまとまっているため移動や設置が容易	ロボットとセンサがそれぞれ移動可能で自由に設置場所を選択・変更可能
課題等	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボット可動領域以外のエリアの計測が困難</li> <li>ロボットやセンサを他の複数のロボット等と組み合わせて使用することが困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットとセンサのそれぞれに無線通信用の端末が必要</li> </ul>

図1 産業用ロボット無線化の構成例

不可欠である。

一般的に、産業用ロボットを使用するためには、ロボットに接続されたコントローラに事前にその動作の組合せをプログラミングする必要がある(教示作業)。その際、対象物の向き・位置の正確な計測を行うために3次元計測センサを用いる場合であれば、計測した実データや対象物の3次元CADデータも事前にコントローラに登録する必要がある。さらに、ロボットや関連するFA機器と3次元計測センサの相対位置関係も事前に登録して動作させる必要があるため、通常はこれらの機器は工場に固定して運用することとなる。産業用ロボットとコントローラおよびその他FA機器の設置を容易にして柔軟な配置換えを可能にするためには、これらの機器間の通信を無線化するだけではなく、人手によるロボットの教示作業およびセンサのキャリブレーション作業を不要にすることが必須である。

そこで、本実証では図1のパターン2の構成を採用するとともに、すべての機器の信号受信および配信と制御計画を自動生成する中央コントローラ機能を開発し、機器の配置換えに伴って発生するキャリブレーションやロボットの再教示が不要なシステムを構築した。本システムでは、3次元計測センサによって計測した環境の3次元位置情報を、3次元点群(PCDs: Point Cloud Data sets)として中央コントローラに伝送する。次に、中央コントローラで対象物の位置と姿勢を検出し、障害物に接触しないように対象物を把持し、指定の位置に搬送して解放する一連の産業用ロボットの動作指令を自動生成し、コントローラに送信する。産業用ロボットの動作開始後は、その動作状況を中央コントローラで監視する。また、3次元計測センサの自動キャリブレーションアルゴリズム<sup>9)</sup>を搭載することで、3次元計測センサ

の配置換えに迅速に対応可能なシステムを実現した。

### 3. 5G実証システムの構築と稼働実験

産業用ロボットシステムへの5Gの適用可能性と、無線化によるFAシステムの利便性の向上を検証するため、産業用ロボットと3次元計測センサが5Gで通信するピックアンドプレースシステムを構築し、実証実験を行った<sup>10)</sup>。構築したシステムの概要を図2に示す。

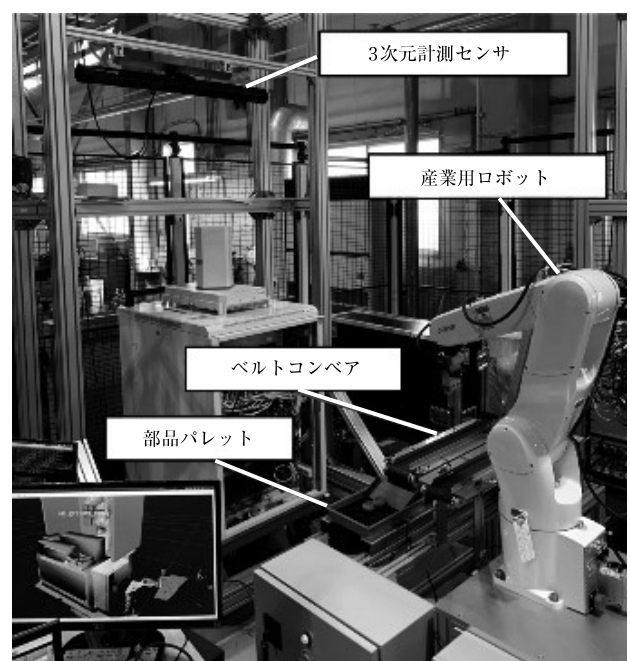


図2 実証システムの概要

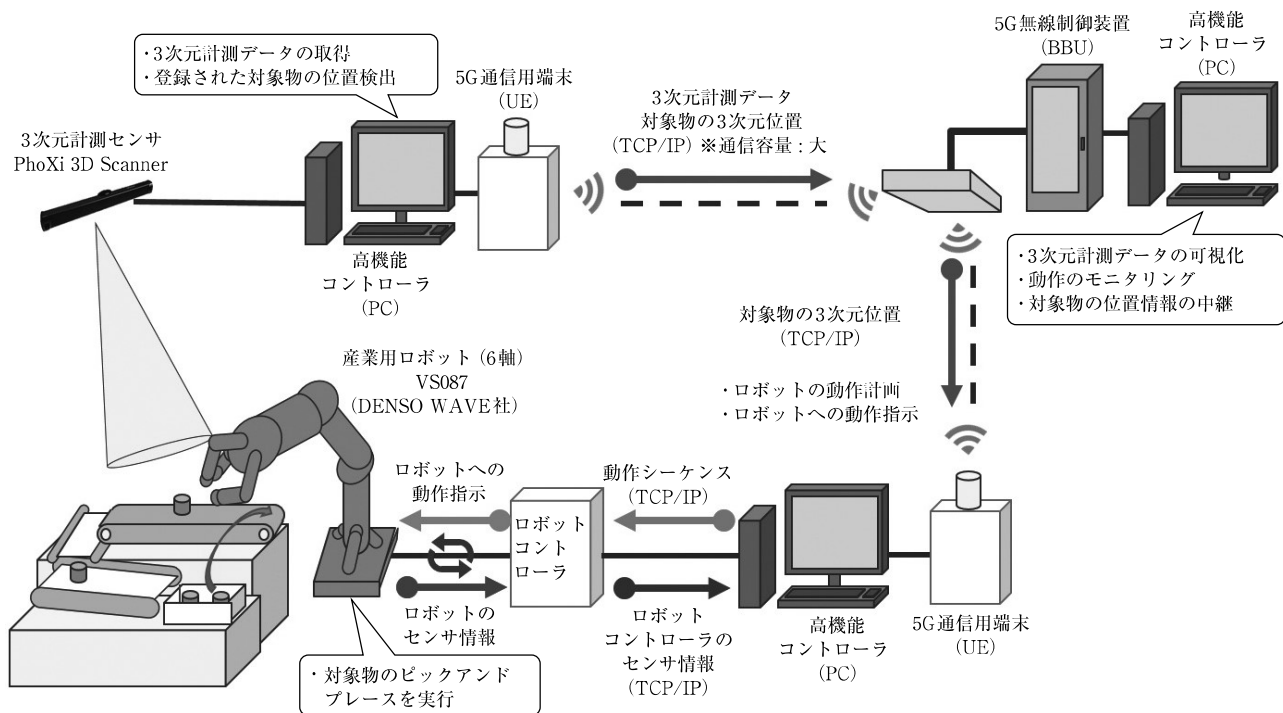


図3 実証システムの全体構成

### 3.1 システム構成

本実証で開発したシステムにおける情報の流れと全体構成を図3に示す。本システムは、産業用ロボットとロボットコントローラ、3次元計測センサ、高機能コントローラ、ベルトコンベヤ、5G通信機器で構成される。

産業用ロボットとして、デンソー社製の6軸垂直多関節型ロボットVS087を使用した。ロボットの制御は、高機能コントローラによって生成した逐次動作コマンドをロボットコントローラへ伝送することによって行う。対象物を把持するグリッパとして、IAI社製の平行チャック型グリッパRCP4-GRSMLを使用した。ロボットの作業空間を3次元計測するセンサとして、Photoneo社製のPhoXi 3D Scanner XLを採用した。これは、カメラとプロジェクタを用いたアクティブステレオ方式の3次元計測センサであり、クラス3Rレーザ光を照射して計測を行う。ロボットの動作計画や対象物の計測データ可視化のために、Open Source Robotics Foundationによるロボット用ミドルウェアROS（Robot Operating System）を利用した。さらに、Photoneo localization SDKを利用し、計測によって得られた対象物の位置と姿勢の情報に基づき、ロボットが対象物を把持してベルトコンベヤの部品投入位置に投入する動作を自動的に生成して実行する仕組みを構築した。

本実証で使用した5G通信機器の諸元を表1に、概観を図4に示す。3次元計測センサを接続した高機能コントローラと、ロボット（ロボットコントローラ）を接続した高機能コントローラにそれぞれ図4(a)に示す5Gの端末装置を接続

表1 実証に使用した5G通信機器諸元

	無線基地局	無線端末
中心周波数 [GHz]	27.57975	
周波数帯域幅 [MHz]	91.5	
複信方式	TDD	
最大送信RANK数	2 (DL)	1 (UL)
変調方式	OFDM	
サブキャリア変調	QPSK, 16QAM, 64QAM	
サブキャリア間隔 [kHz]	75	
TTI [ms]	0.2	
垂直ビーム半値角 [度]	12	Omni (4方向アンテナ) 受信: 4方向の電波の合成が可能 送信: 4方向のうち1方向を選択
垂直ビーム走査範囲 [度]	± 15	
水平ビーム半値角 [度]	12	
水平ビーム走査範囲 [度]	± 60	
送信電力/ビーム [dBm]	10	12.5
送受信ケーブル損失 [dB]	0	2.5
受信アンブ利得 [dB]	—	10
最大アンテナ利得 [dBi]	23	5
最大EIRP/偏波 [dBm]	33	15

することにより、図4(b)に示すアンテナを有する基地局を介してセンサとロボット間が28GHz帯を使用する5Gで通信するようなシステム構成となっている。また、本実証における転送データの特性として、3次元計測センサから送信される3次元点群データが大容量であることに対応するため、TDD (Time Division Duplex) の比率を、DL (Down Link) 1 : UL (Up Link) 14と上り方向のスループッ

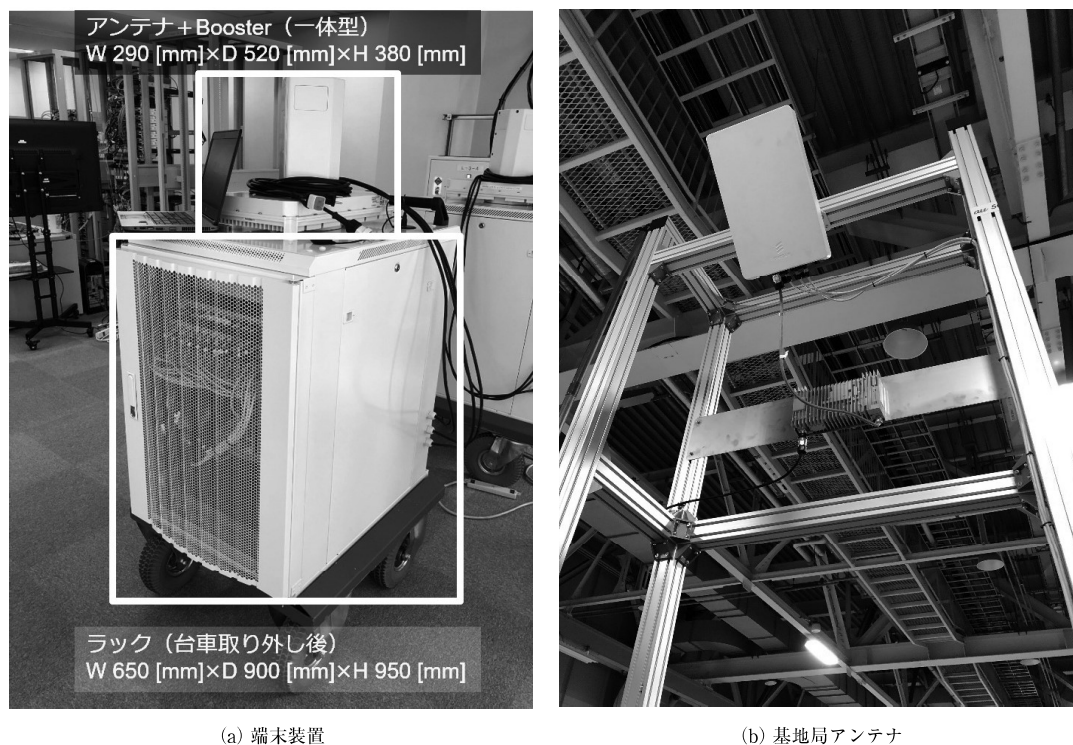


図4 実証に使用した5G通信機器

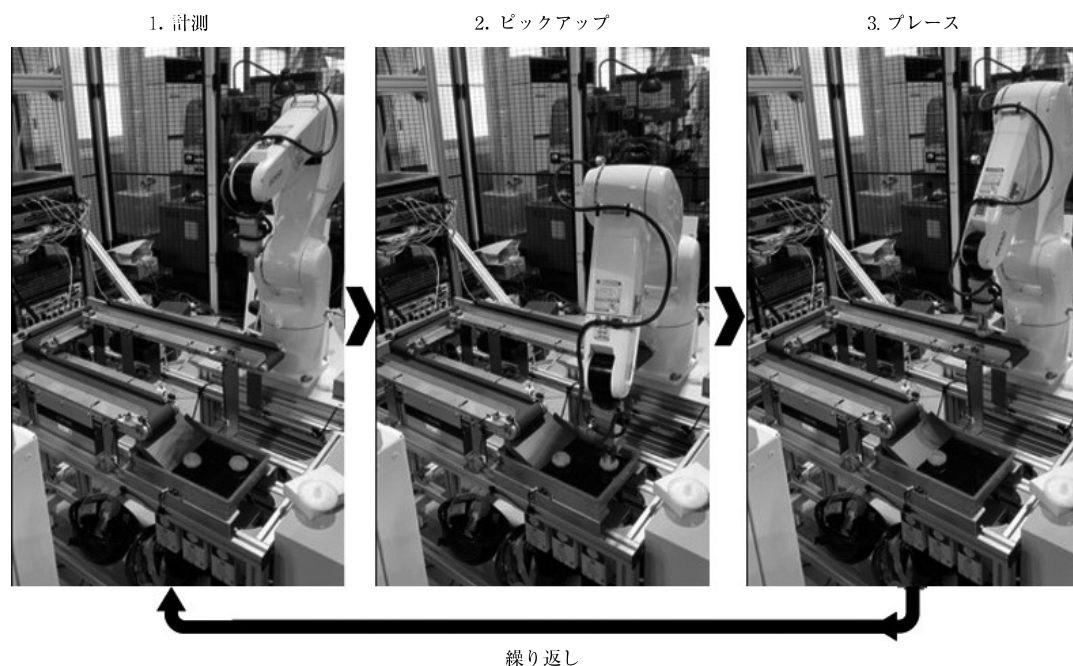


図5 実証システムの動作

ト重視に設定した。

### 3.2 稼働実験

実証システムの動作の流れを図5に示す。本システムは、産業用ロボットが部品パレットから対象物を把持して持ち上げ(ピック)、ベルトコンベアの部品投入位置まで運んだ後、部品を投入する(プレース)動作を行う。投入された部

品はベルトコンベアによって搬送され、再度部品パレットに戻るが、その際にベルトコンベアから転がり落ちるようになっており、対象物が部品パレット上のどこに戻るかが予測できないように構成されている。ロボットは、センサーで計測した情報に基づき、対象物の位置と状態を検出し、自動的に作成された動作計画に基づいて対象物の一つずつ



(a) 配置換え前



(b) 配置換え後

図6 工場における配置換えの実証

運ぶピックアンドブレース動作を繰り返す。

構築したシステムを実際に動作させた結果、3次元計測センサによる対象部品位置と姿勢の検出、その計測データを5G通信によって伝送可能であること、計測データからロボットを適切に制御し、ピックアンドブレース動作が正しく連続して動作することを確認した。九州工業大学の実習工場における動作検証により、工作機械等が多数設置された屋内環境において、5Gの通信が3次元計測センサからの大容量データ転送に必要な性能を有することを確認した。

さらに、実際の製造現場における5G通信への影響や、配置換えの有効性を検証するため、開発したシステムを自動車部品工場である(株)デンソー九州の工場に設置して実証実験を行った。工場内において、ロボットとベルトコンベヤ、3次元計測センサの相対位置関係を変更した場合でも教示レスでピックアンドブレース動作が可能であるかどうかを検証した際の配置換え前後の状況を図6に示す。検証の結果、5Gを用いた無線化および教示レス動作を可能にするシステムの導入により、配置換え動作を10分程度で完了し、ロボットの動作を再開可能であることを確認した。通常のシステムであれば、配線を含む機器の移動に加えて再教示に必要な時間を考慮すると配置換えに約半日程度の時間を要する作業が大幅に短縮可能であり、本システムがリードタイム短縮に有効であることが実証された。

### 3.3 実証のまとめ

本実証の結果は、開発したピックアンドブレース以外のFAシステムへの5Gの導入においても、情報伝送のための配線を省略し、機器のレイアウトの自由度の向上やリードタイムの短縮をもたらすことを示唆している。無線化による配線の省略が有効性を発揮するのは、例えば、多数の協働ロボットが作業者と連携する作業現場などが挙げられる。また、多数の構成要素が同時に情報を共有するシステ

ムや、連携する機器間の距離が長いシステム、頻繁な配置換えを必要とするシステムなどにおいて、信頼性のある高速大容量通信を実現する5G導入の有効性が高まると考えられる。

## 4. ローカル5Gへの期待

製造業分野において、工場内の機器同士が通信するために5Gを活用する場合など、特定の領域内で5G通信を利用するにあたっては、日本国内では「ローカル5G」を活用することが有効であると期待される。ローカル5Gは、通信事業者以外の企業等が屋内または特定の敷地内などで自ら免許を取得して5Gシステムを構築することが可能であり、公衆網とは独立に運用、利用が可能となる。令和2年3月現在では、ローカル5G用に28GHz帯の100MHz幅を利用するための免許申請が可能であり、今後は4.6GHz帯の利用も可能になるため、さらに利活用の可能性が広がるものと期待される。九州工業大学では地元通信事業者である(株)QTnetと連携して、戸畑キャンパス内にローカル5G環境を構築しており<sup>11)</sup>、この環境を活用して、今後、産学連携による多様なアプリケーションの実証実験ならびに研究開発を実施する予定である。

## 5. むすび

産業用ロボット活用の高度化に向けて、高速大容量、低遅延かつ信頼性が高く安定して利用可能な無線通信技術が重要な役割を担うことが期待される。ただし、製造現場におけるさまざまな課題を解決するためには、産業用ロボット制御における教示レス化や多様なセンサ活用などの生産システムそのものの高度化が不可欠である。

本稿で紹介した実証実験によって、5Gで提供される高速大容量通信が、3次元計測センサと高機能制御装置によっ

て構成される産業用ロボット制御の高度化に有効に機能し、自由度の高い生産現場の実現に寄与することを確認した。今後は、生産現場の高度化に向けて、ローカル5Gを始めとする多様な無線通信の有効利用ならびに無線化のメリットを最大化する先進的なロボット制御システムの開発に取り組む。

(2020年4月10日受付)

## 〔文 献〕

- 1) 井尻善久, Felix von Drigalski: “産業用ロボットの進化によるものづくりの近未来”, 日本ロボット学誌, **37**, 8, pp.675-678 (2019)
- 2) 大西 猷: “製造業ロボット省配線・ワイヤレス技術の動向”, 日本ロボット学誌, **33**, 5, pp.334-337 (2015)
- 3) 長谷川敏, 林尚典: “工業用無線の特徴および導入状況と国際標準化動向”, 計測と制御, **55**, 12, pp.1066-1071 (2016)
- 4) T. Sakurai and S. Yamamoto: "Gateway DTM for ISA100.11a Wireless Adapter Supporting HART and Modbus Protocol", Proc. of SICE Annual Conf., pp.1138-1143 (2014)
- 5) 板谷聡子ほか: “製造現場における多種無線通信～Smart Resource Flow無線プラットフォームの提案～”, 信学技報, **116**, 147, pp.13-18 (2016)
- 6) F. Voigtlaender, A. Ramadan, J. Eichinger, C. Lenz, D. Pensky and A. Knoll: "5G for robotics: Ultra-low latency control of distributed robotic systems", Proc. of International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls, pp.69-72 (2017)
- 7) J. Chenga, W. Chena, F. Taoa and C.-L. Linb: "Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing", Journal of Industrial Information Integration, **10**, pp.10-19 (2018)
- 8) N.A. Mohammed, A.M. Mansoor and R.B. Ahmad: "Mission-Critical Machine-Type Communications: An Overview and Perspectives towards 5G", IEEE Access, **7**, pp.127198-127216 (2019)

- 9) Y. Ninomiya, Y. Arita, R. Tanaka, T. Nishida and N.I. Giannoccaro: "Automatic Calibration of Industrial Robot and 3D Sensors using Real-Time Simulator", Proc. of International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT), TA2.3 (2018)
- 10) 横田篤紀, 本田空, 山福佳, 西田健, 池永全志, 森直樹, 松永彰, 丸山翔, 吉田享広, 長田真太郎: “産業用ロボット制御への第5世代移動通信システムの適用”, 電気学論D, **140**, 4, pp.314-326 (2020)
- 11) “九州初, QTnetがローカル5G[無線局免許]を取得”, <https://www.kyutech.ac.jp/whats-new/press/entry-7370.html>



**池永 全志** 1992年, 九州工業大学大学院情報工学研究科修了。同年, 日本電気(株)入社。1996年, 長崎大学総合情報処理センター助手。1999年, 九州工業大学情報工学部電子情報工学科助手。2004年, 同大学大学院工学研究科助教授。2011年より, 同大学大学院工学研究院教授。インターネットにおける経路制御, 通信品質制御, 無線LAN, センサネットワーク等に関する研究に従事。博士(情報工学)。



**西田 健** 2002年, 九州工業大学大学院工学研究科修了。同年, 同大学助手。2013年より, 同大学大学院工学研究院准教授。2018年, LORIA研究所客員研究員, サレント大学客員研究員。2019年より, KiQ Robotics(株)CTO。ロボットハンド, 確率システム制御, ニューラルネットワーク, 屋外自律移動ロボット, 3次元計測などに関する研究に従事。博士(工学)。