

解 説

産業用ロボットの次世代技術について

On Next Generation Technologies for Industrial Robots

原 田 研 介^{*1*2} 万 偉 偉^{*1*3}^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科 ^{*2}産業技術総合研究所人工知能研究センター ^{*3}産業技術総合研究所知能システム研究部門Kensuke Harada^{*1*2} and Weiwei Wan^{*1*3}^{*1}Graduate School of Engineering Science, Osaka University^{*2}Artificial Intelligence Research Center, National Inst. of Advanced Industrial Science and Technology^{*3}Intelligent Systems Research Institute, National Inst. of Advanced Industrial Science and Technology

1. は じ め に

日本は、しばしばロボット大国とよばれる。特に、産業用ロボットの分野について言えば、最初の本格的な産業用ロボットである UNIMATE を 1970 年代前半に川崎重工がトヨタ自動車の工場に導入したことを契機に、日本において産業用ロボットの導入や開発が爆発的に進んだ。よく知られているように、1980~90 年代においては全世界の約 3 分の 2 の産業用ロボットが日本国内で稼働し [1]、日本製の産業用ロボットの世界シェアは 8~9 割程度であった [2]。

その後、世界的に産業用ロボットの導入が進んだことにより、世界における産業用ロボットの稼働台数に対する日本国内の割合自体は減ってきているものの、依然として日本が産業用ロボットに関して世界の中心的な役割を果たしていることについて異論はないと考える。しかしながら、ここにきて産業用ロボットに関して多くのムーブメントが起こっており、これに伴い産業用ロボットは現在曲がり角に差し掛かろうとしていると感じている。

筆者は、主に共同研究や委員会などを通じて産業用ロボットに接してきた。筆者自身は大学に籍を置き、直接製造業に携わっているわけではないが、筆者が見聞きした範囲で近年の産業用ロボットに対して感じていることや考えていることをまとめ、一つの提言としたいと考えた。ここで、産業用ロボットを研究対象とする研究者は比較的少なく、産業用ロボットに関する研究開発が重要であるにもかかわらず、産業用ロボットが直面する問題点についてあまり広く認識されていないと感じている。そこで、研究者の間で認識を共有する意味も込めて、本稿を執筆した。本稿における提言の中で、次世代の産業用ロボットに必要な技術についても自ずと浮かび上がってくる。本稿では、まず製造工程のうち特に組立作業にフォーカスを置いて、近年の産業用ロボットが直面している問題点について簡単に説明する。次いで、今後の技術開発の方向について説明する。本解説



図 1 問題点とその解決

における内容を整理するために、図 1 に問題点とその解決についてまとめた。

2. 問 題 点

本章では、まず近年の産業用ロボットが直面している問題点について説明する。ロボット化が遅れている作業工程として、組立工程や検査工程などがあるが、ここでは組立作業に絞って簡単に説明する。ただし、ほかの工程についても当てはまる点が多いと考える。よく知られているように、消費者の趣向にきめ細かく対応するために、製品の製造形態は大量生産から多品種少量生産、あるいは変種変量生産へと移行してきた [3]。しかしながら、この製造形態にはロボット化を困難にするいくつかの要因が存在している。

まず、現在の産業用ロボットは教示再生方式で動作を生成している。この方式のルーツは G. Devol が 1954 年に出願した特許にまでさかのぼる。この技術革新が激しい時代に、教示再生方式は 60 年以上大きな変化がないまま産業用ロボットの動作生成方式として広く用いられてきた。教示再生方式は、一度ロボットの動作を生成したら、ある程度の期間にわたってロボットが同じ動作を繰り返す場合には有効であるが、多品種少量生産や変種変量生産において動作が頻繁に変更される場合は、動作の教示が困難になることが知られている。

次に、ロボットによる組立作業を実現するために必要なことは、ロボットを買ってきて動作を作るのみではない。必要なロボットの台数を決め、ロボット化に適した作業手順やセンサフィードバックの方策を決めなくてはならない。さらに、ロボットの周辺機器として、視覚センサ、パーツフィーダ、治具などを用意し、部品ごとに必要なツールを設計することが必要になる。ロボット化にかかる費用の中

原稿受付 2019 年 9 月 17 日

キーワード: Industrial Robot, Assembly Work, Co-worker Robot

^{*1}〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3^{*2}〒135-0064 江東区青海 2-3-26^{*3}〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1^{*1}Toyonaka-shi, Osaka^{*2}Koto-ku, Tokyo^{*3}Tsukuba-shi, Ibaraki

でロボットの購入費用は半分以下と言われており、残りの半分以上を周辺機器やシステムインテグレーションにかかる費用が占めている。組立作業のロボット化はシステムインテグレーションに関する経験や豊富な知識を基に設計されるのが普通であるが、特にパーツフィーダ、治具、専用ツールなどは製造する製品が変わるごとに変更を施さなくてはならず、製造のフレキシビリティを下げる要因となっている。特に、多品種少量生産では、頻繁に設備に変更を加えなくてはならなくなるため、ロボット化を困難にする大きな要因の一つとなっている。さらに、製造工程の中にはロボット化自体が困難な作業工程が含まれていることが原因で、ロボット化が根本的に困難である可能性もある。この点については、後にもう少し掘り下げて考える。このように、多品種少量生産のロボット化を行う場合、システムインテグレーションに関する経験や知識を基に、生産台数や製造工程に難作業がどの程度含まれるかなどを注意深く調べたうえで、ロボット化を行うか、行わないとしたらどのような方策でロボット化を行うかを慎重に決定しなくてはならない。

このように、多品種少量生産をロボット化する際には、現状では事前に製造工程のロボット化に関する検討を十分に行う必要がある。ここで、多くの製造系の大企業は専属の生産技術に関する部署を有しており、この部署の活躍もあり、大企業ではある程度ロボット化は進んでいる感がある。それに比較して、中小企業の多くは自動化に対するノウハウが大企業ほどはなく、大企業と比較してロボット化は遅れていると言える。しかしながら、これは逆に言うと、中小企業の方にロボット導入の余地は大きいということになる。近年のこのような状況に呼応して、システムインテグレータ（以降 SIer と略記）とよばれる職種が注目を集めている。SIer はクライアントである製造系の企業からの依頼に基づいて製造装置を作成し、企業に納入している。ただし、ここにもいくつかの問題点が存在している。まず、製造工程に変更が生じると、ロボットの動作を作り直したり、周辺機器を入れ替えたりする依頼が、クライアントから SIer に行くことになる。多品種少量生産では製造工程の見直しと比較的頻繁に起こるため、SIer にとって製造した装置の手離れが悪いことが問題となる。また、現状において SIer 自体が比較的小規模で独立した企業である場合が多く、この業界はまだ発展途上である。先に述べたようにロボットによる自動化には豊富な経験と知識が必要であるにもかかわらず、これらの経験と知識は SIer 間で共有されないまま各 SIer のノウハウとして留まっている。これも、多品種少量生産のロボット化を困難にする一因となっていると考えられる。

組立作業をロボット化するためには、豊富な経験と知識が必要だが、それでは、組立作業の何が本質的に困難なのか、もう少し掘り下げて考えたい。筆者は組立作業を研究の題材の一つとしていることもあり、よく企業の工場に行き、自動化が可能かどうかの相談を受けることが多い。多くの場合において自動化が可能かどうかの見極めは容易で

はないが、これにはいくつかの要因があると考えている。まず、ヒトはロボットを擬人化して、ヒトにできることはロボットにもできると考えがちである。つまり、ヒトは組立作業を一見容易に行っているの、同じ作業をロボットも容易に行うことができるという先入観である。しかしながら、この先入観が作業の困難さを認識することを困難にしている。実際は、ヒトの手や指は十分な自由度を持ち、作業を行う際は、手の感覚情報や視覚情報を適切に利用している。それに対し、ロボットにはヒトに相当するような感覚情報が得られない場合が多く、仮に得られたとしても、それをどのように利用するか知識をこちらから適切に与えてあげなくてはならない。このような、ヒトと類似したセンサフィードバック機能を実装できないのであれば、その代替として周辺機器を揃えたり、作業のコツをシステムインテグレータがロボットに直接教え込む必要性が生じる。

次に、ロボット側の要因だけではなく、作業自体にもロボットによる組立作業を困難にする要因が潜んでいる。組立作業には、糊などの粘着物や流体、粉末など、作業対象の物理的特性を十分に理解しないと、ロボットによる組立作業ができない工程が存在する。しかしながら、ロボットの専門家は多くの場合、これらの物理的特性については詳しくない場合が多く、ロボット化に際して、これらの物理的特性について一から勉強をしなくてはならない。例えば、料理をするロボットを開発しようと思うと、食材の特性について十分理解しなくてはならないことなどが、この典型的な例である。このような場合、ロボット化は想定以上の時間を要することになる。これは、我々ロボットマニピュレーションの研究者も同様であり、ロボットマニピュレーションの研究とは、しばしば対象の物理的特性の研究と表裏一体である。

3. 問題の解決に向けて

次に、前章で述べた問題点の解決に向けて、現在行われている取り組みについて簡単に述べる。

3.1 協働ロボット

工場のスペースが限られる場合など、ロボットの周囲に安全柵を設置したくない場合がある。このような場合に対処するために、近年いわゆる「協働ロボット」が注目を集めている。協働ロボットとは、ロボットの周囲に柵を設けなくてもよく、ヒトとサイド・バイ・サイドで協働できるため、工場におけるロボット導入の障壁を下げるのに貢献している。協働ロボットとして一番有名なのは、ユニバーサルロボット社の UR シリーズ [4] であるが、近年これ以外にも非常に多くの協働ロボットが開発されており、すべてをフォローするのは困難になる程である。また、ここ数年で協働ロボットの低価格化が顕著である。筆者は、もうじき協働ロボットは低価格ロボットを指す言葉へと変化するのではないかと感じている。これらの協働ロボットは、大手の産業用ロボットメーカー以外の新興メーカーで多くが開発されている。しかしながら、現状において動作の信頼性に関しては、新興メーカーの協働ロボットよりも、大手

の産業用ロボットメーカーのロボットの方に1日の長があるようである。ただし、現状においてSIerは産業用ロボットメーカーとは独立に事業を展開している場合が多く、クライアントの要求に応じて比較的自由にロボットを選択している。このとき、クライアントが精度が低くても低価格なロボットを求める場合も想定され、今後低価格な協働ロボットの導入がより一層進むことも想定される。

ここで、協働ロボットでは、関節のトルクを制御することにより、ヒトがロボットの手先を持ってロボットを比較的自由に動かすことを可能にしているものが多くみられる。先に述べた教示再生方式の問題点を解決すべく、この特徴を活かしてヒトがロボットの手先を直接持って動作を教示する直接教示方式を採用している協働ロボットが多く見られる。また、ほかにタスクごとにブロックを並べるような動作生成方式を採用しているロボットもある[5]。しかし、直接教示方式はロボットの動作を粗く容易に教えるのは得意である反面、例えば精密作業の場合などは一旦教示をした後で動作の微修正が必要になることが多い。教示の困難さの問題に対する解決は、まだ道半ばである。また、リスクアセスメントの実際の運用が確立されていないことも問題である。

3.2 知識の共有

多品種少量生産のロボット化には豊富な経験と知識が必要であることを説明した。先に述べたように、この知識はロボット化ができるかどうかの見極めから始まり、ロボットが何台必要か、複数台をどのように協調させるか、どのようなグリッパや治具を設計するか、どのようなセンサフィードバックを行うか、また、どのような手順で作業を行い、どのような動作を生成するかなど多岐にわたる。ロボット化を広めていくため、またSIerが発展していくためには、この経験と知識の共有や、これらを伝承する教育が重要である。筆者は、近畿圏に軸足を置くが、ここでも中小企業のロボット導入を促進するための様々な施策について話し合いが行われており、システムインテグレーションに関する教育や知識の共有も大きな話題の一つである。知識の共有についても実際に試みが行われているが、本格的な展開とは言えないのが現状である。これにはいくつかの理由があると考えられるが、その一つに使いやすい知識の共有を行うソフトウェアプラットフォームがなく、共有のメリットが十分に享受できていないことが挙げられるのではないかと考えている。Hanaiら[6]は、教示した動作をデータベースに蓄積し、類似した動作に対して修正を行ったうえで再利用を可能にするソフトウェアプラットフォームの開発を行っている。このようなプラットフォームをSIerにとって使いやすいものとし、広めていくことは今後の課題である。SIer どちらの横の繋がりを強化し、知識の共有を推進することも、まだ道半ばである。

なお、Universal Robot 社[4]は、他社製の周辺機器を自社のURシリーズのロボットと接続可能なものをUR+として認定する試みを行っている。ロボットのシステムインテグレーションにおいては、ロボットと周辺機器とを接続

する必要がある。これが容易にできることは、システムインテグレーションを自体を容易にする大きなステップであると考えられる。このような試みは、これから他社も追随することが想定される。

3.3 動作計画・機械学習

産業用ロボットをターゲットとした、動作計画[7][8]や機械学習[9]の研究が行われている。これらの研究は、ロボットによる組立動作の完全な自動生成を目指していることが特徴である。動作計画とはロボットの目標姿勢やタスクに関する情報を与えることで、ロボットが作業する動作を探索するアプローチである。それに対して、機械学習はロボットが実際に作業を行った際の成否や、模範となる情報を基にロボットの動作を改善していくアプローチである。動作計画は、ロボットの逆運動学、干渉回避など下位のレベルから作業情報などの上位のレベルを徐々に構築していくボトムアップ的なアプローチであるのに対して、機械学習はある作業を仮定して、その作業に特化したロボットの動作を作っていくトップダウン的なアプローチである。よって、これらは競合する技術ではなく、融合していくべきものと考えている。理想的には、これら動作計画や機械学習を駆使することで、完全に自律的な組立作業の動作生成が実現されることが望ましいが、先に述べた経験や知識をどのようにして動作計画に含めるか、あるいは学習で得られた動作をどのようにして汎化させるかなど、難しい問題が多く残っている。動作教示に関して現状の方法では、どれも常に教示コストの問題が付きまとう。今後、教示と動作計画や機械学習を統合していくことにより、状況に応じて過去の教示結果や学習の結果を呼び出したり、動作計画を行ったりするというのが、現実的に目指すべき方向性と考えている。

3.4 汎用グリッパ

SIerの重要な知識の一つに、グリッパや治具の設計にかんするノウハウが挙げられる。動作計画や機械学習によりロボットの動作を生成できたとしても、実際に作業が成功するかどうかは、ハンドが確実に対象物を把持できているかどうか依存する。このためのアプローチとして、センサフィードバックを用いる方法とグリッパに工夫を加える方法の2種類がある。特にグリッパは、単一のグリッパが少ない自由度で多くの種類の対象物を確実に把持できることが望ましい。また、把持した対象物のグリッパに対する相対的な位置・姿勢が決まっていることが望ましい。例えば、多種類のペグ挿入作業を可能にするグリッパ[10]、プーリに挿入した軸を固定可能なグリッパ[11]、押し付けることで自動的に穴の位置を合わせてネジ締めを行うグリッパ[12]など様々なグリッパが研究されている。これらの研究を継続することで、より多種類の対象物を単一のハンドで位置決め可能なグリッパが開発されてくることが期待されている。

4. 次世代産業用ロボットに向けて

前章までで、現在の産業用ロボットが直面する問題点と、それを解決する試みについて解説した。どの問題点も奥が

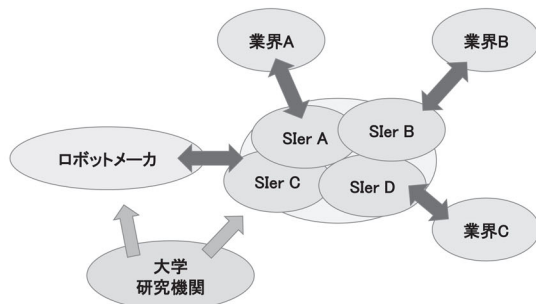


図2 協業の形態

深く、簡単には解決でなさそうなものが多い。しかしながら、日本がこの後10年、20年とロボット大国と言われ続けるためには、今の取り組みが非常に重要である。そのために、まずロボットメーカーの側からはSierとの繋がりを強化したり、新興メーカーのロボットと差別化できるような、ある程度高性能で低価格なロボットを開発したり、Sierの要求をある程度反映させたカスタムメイドなロボットを開発することなどが求められていると考える。Sierの側からは、人工知能的なアプローチに強いSierを育むと同時に、Sierどうしの横の繋がりを強化させて経験と知識の共有を行うことが求められている。また、これらの課題は一企業のみで解決が可能なものではない。大学などの研究機関の側は、産業用ロボットをターゲットとした比較的大型の研究プロジェクトを組織し、Sierやロボットメーカーを直接的・間接的に支えていけるような研究テーマを設定し続けることが重要である。この場合のロボットメーカー、Sier、大学などの研究機関との関係を図2に示す。

5. お わ り に

本稿では、現在の産業用ロボットを取り巻く現状から、その問題点を明確にし、問題点の解決に向けた取り組みを紹介

介した。

謝 辞 本稿を執筆するにあたり、議論をしていただいた、新エネルギー・産業技術総合開発機構佐藤知正先生、ならびに智頭電機(株) 芦谷直人様、(株) 安川電機足立勝様、川崎重工(株) 真田知典様、東洋理機工業(株) 細見成人様(50音順)に感謝します。

参 考 文 献

- [1] 世界の産業用ロボット稼働台数, 日本ロボット工業会, 2015.
- [2] ロボットによる社会変革推進会議: ロボットを取り巻く環境変化と今後の施策の方向性~ロボットによる社会変革推進計画~, 報告書, 2019.
- [3] 小平: 製造の未来を切り開くロボットセルの価値と課題, Monoist, 2014.
- [4] UR robots, <http://universal-robots.com>
- [5] Intera@, <https://www.rethinkrobotics.com/intera>
- [6] R. Hanai, K. Harada, I. Hara and N. Ando: "Design of Robot Programming Software for the Systematic Reuse of Teaching Data Including Environment Model," ROBOMECH J., vol.5, no.21, 2018.
- [7] W. Wan, K. Harada and K. Nagata: "Assembly Sequence Planning for Motion Planning," Assembly Automation, vol.38, no.2, 2018.
- [8] W. Wan, F. Lu, Z. Wu and K. Harada: "Teaching Dual-arm Robots to Do Object Assembly using Multi-modal 3D Vision," Neurocomputing, vol.259, pp.85-93, 2017.
- [9] P.C. Yang, K. Sasaki, K. Suzuki, K. Kase, S. Sugano and T. Ogata: "Repeatable folding task by humanoid robot worker using deep learning," IEEE Robotics and Automation Letters 2, vol.2, pp.397-403, 2018.
- [10] K. Nie, W. Wan and K. Harada: "An Adaptive Robotic Gripper with L-shape Fingers for Peg-in-hole Tasks," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.4022-4028, 2018.
- [11] J.C. Triyonoputro, W. Wan and K. Harada: "A Double Jaw Hand Designed for Multi-object Assembly," Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.403-408, 2018.
- [12] T. Nishimura, M. Tennomi, Y. Suzuki, T. Tsuji and T. Watanabe: "Lightweight, High-Force Gripper Inspired by Chuck Clamping Devices," IEEE Robotics and Automation Letters, vol.3, no.3, pp.1354-1361, 2018.



原田研介 (Kensuke Harada)

1997年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年広島大学工学部助手。2002年産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員, 2005年から1年間Stanford大客員研究員, 2013年同研究所タスクビジョン研究グループ長, 2016年大阪大学大学院基礎工学研究科教授, 同年産業技術総合研究所特定フェロー, 現在に至る。ロボットハンドによる把持や操りに関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会の会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)



万 偉 偉 (Weiwei Wan)

2013年東京大学大学院工学研究科工学系研究科博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。同年カーネギーメロン大学客員研究員 2015年産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員, 2017年大阪大学大学院基礎工学研究科准教授, 現在に至る。運動計画やロボットによる操りに関する研究に従事。IEEEの会員。博士(工学)。