

2.2.9 産業用ロボット

（1）研究開発領域の定義：

産業用ロボットは、製造業で利用されるロボットに関する研究開発領域である。利用分野として、従来からロボットが導入されている重工業、自動車産業、電気電子産業に限定せず、食品産業など新しいロボット利用分野も対象とする。ものづくりを想定しているので、最終的には実用化、事業化に結び付く要素技術開発とシステム技術開発が目的となる。

（2）キーワード：

製造業、ものづくり、ロボットアーム、エンドエフェクター、移動マニピュレーター、協働ロボット、柔軟ハンド、機械学習、センサーフィードバック制御、ジャミンググリッパー

（3）研究開発領域の概要：

〔本領域の意義〕

産業用ロボットは、重工業、自動車産業、電子機器産業などで数多く利用され、日本製の産業用ロボットの海外輸出も順調である。現状の産業用ロボットの利用環境は、教示再生方式を基盤としており、環境変動に対する適応能力は極めて低い。この問題を解決するために、カメラをはじめとする種々のセンサーを搭載する研究開発方向にある。また、柔らかい物体、形状にばらつきがある物体等の把持、操作を可能とするために、ロボット関節やハンドを柔軟にした柔らかいロボット実現に向けて世界的に研究開発が推進されている。現在は、60年以上継続してきた従来型のロボットアームの機構と制御方式から、新しい方式へのロボット技術の転換期と位置づけられ、本領域の研究開発を行う意義は大きい。

〔研究開発の動向〕

産業用ロボットの利用拡大

国際ロボット連盟（IFR）2020年の報告書¹⁾によれば、日本の工場で稼働している産業用ロボットの台数は、過去最高の約35万5000台となっている。産業用ロボットの利用は増加している。ロボットの導入台数が最も多い分野は電気・電子産業で、日本全体の34%を占める。海外においても産業用ロボットの導入は多く、中国では約78万台、インドは約26万台となっている。

新しい分野への導入

先進諸国では、物流、食品、外食、サービスなどの分野では人手不足が深刻化しており、従来にも増してロボットの利用拡大への期待が高まっている。産業用ロボットの利用分野拡大の例として、食品産業への導入が挙げられる。従来型の産業用ロボットが扱う規格化された部品とは異なり、食品は柔らかく、形、大きさ、硬さなどにばらつきがあり、正確にハンドリングすることは難しい。このため、後述するmGrip等の柔軟性を有するロボットハンドが導入されている。また、食品工場の特長である生産ラインの頻繁な変更への対応、人との協働作業を可能とする安全性の確保、オイルや機械の破片等の混入対策、食品製造に適合した衛生対策等が課題として挙げられる。

これらの課題や費用対効果の問題等があり、食品産業へのロボット導入は必ずしも大きな動きにはなっていない。

移動マニピュレーター

2019年の国際ロボット展では、自走可能な移動ロボットにロボットアームを搭載したモバイルマニピュレーターや、台車上にロボットアームを搭載し移動可能としたシステムが、多数の国内産業用ロボットメーカーから発表された。これらは、多品種少量生産に伴う頻繁な生産ラインの組み替えや、大型機械や船舶などの構造体の製造への対応を可能とする近未来の製造システムとして注目されている。従来の産業用ロボットは、床に固定して利用するため設置場所を容易に変更できないが、一旦設置すればエンコーダなどのロボットの内界センサーによるフィードバック制御によって、高い手先位置精度が確保できた。一方、移動ロボットや非固定のロボットアームでは、このような制御ができないため、カメラなどの外界センサーによる高精度な制御の実現が課題として挙げられる。

協働ロボット

デンマーク企業の Universal Robots 等による協働ロボットが日本国内でも販売台数を増やしている。協働ロボットは、人と一緒に作業することを前提とした産業用ロボットである。従来の産業用ロボットは柵で囲われて人の作業環境とは分離した環境で作業していたが、協働ロボットは、出力や速度の制限、近接センサーや力覚センサーによる自動停止機能、柔軟材料による衝突力の低減等の保護手段を備えることで、人と作業環境を共有した協働作業を可能としている。従来の産業用ロボットに比して速度、精度では劣るが、新しい利用分野では、必ずしも高速性と高精度が求められない場合も多く、協働ロボットの利用が拡大していくと考えられる。

柔軟性を有するロボット

従来の産業用ロボットは、金属材料による高剛性の構造を有し、高速回転する電動モータの回転数を高減速比ギアなどで下げ高トルク化することで、高精度の作業を実現している。このため、ロボットの関節や手先は硬く、柔らかい物体の把持といった柔軟な動作は苦手としている。一方、産業用ロボットの利用拡大に向けて、様々な物体の把持・操作を容易に実現できる柔軟性がロボットに対して求められている。柔軟性を生み出す方法としてセンサーフィードバックによる制御の柔軟化、関節部やエンドエフェクター部への柔軟要素の付加による機構の柔軟化、ロボットを軽量化し低減速比ギアを用いることによる駆動の柔軟化などが挙げられる。

AI／クラウド利用のロボット

IoT技術を活用した産業用ロボットの保守点検が実施されている。例えば、ファナックのゼロダウンタイム機能²⁾では、機構部の状態、プロセスの状態、システムの状態、保守時期の情報をクラウド上で集中管理することにより、利用中のロボット部品の予防保守を実施し、故障対応による製造ラインのダウンタイムを無くすことを実現している。また、AIの利用事例として、物体のハンドリングの学習が挙げられる。クラウド上に蓄積した物体とハンドの特性に関するビッグデータを教師データとして機械学習を行うことで様々な物体のハンドリングを可能としている。このような研究は、Google³⁾、Right Hand Robotics⁴⁾、Franka Emika⁵⁾などが発表している。GoogleとRight Hand Roboticsでは日常品などのハンドリング、Franka Emikaでは鍵などの金属部品の挿入作業を対象としている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

センサーフィードバック制御による関節の柔軟化

Franka Emikaの多関節ロボット Panda は、可搬重量約 3kg の 7 自由度小型ロボットアームである。トルクセンサーを用いたセンサーフィードバック制御によって関節の柔軟化を高精度で達成している。トルクセンサーフィードバック制御は、ドイツ航空宇宙センター（DLR）により長年蓄積された技術をもとに KUKA が産業用ロボットに導入した技術であるが、当初の価格は非常に高額（1000 万円以上）であった。Franka Emika は同様の技術を低価格（公表価格 2300 ユーロ）にて市販ロボットに導入している。

3D プリンタによる軽量ロボットアーム

Blue Robotics 社は、3D プリンタにより加工された樹脂製の軽量ロボットアームにより、モータギアの低減速比を可能とし、関節の柔軟化を実現している⁶⁾。低減速比のために手先精度の分解能は劣化するが、高減速比のギアのように摩擦は大きくないので、出力リンクに外力が働くとモータ軸がバックドライブし、幾何情報誤差が存在する場合でも、対象物との間に大きな力の発生を回避できる。また、3D プリンタの利用により低価格を実現し、アーム 1 台あたり 5000 ドルにて販売予定としている。高速性、高精度性が要求されず、価格がロボット導入の障壁となっている分野にとっては利用価値が高い。

モータユニットを組み合わせたロボットアーム

中国企業 innfos のモータユニット SCA（Smart Compliant Actuator）⁷⁾ は、小さな円筒のなかにモータ、ドライバー、エンコーダ、減速機が統合されており、このモータユニットを複数組み合わせることで、小型 4 軸／6 軸ロボットアーム「GLUON」や 4 足歩行ロボットを構築できる。6 軸ロボットアームの場合、重量 2.5kg で手先可搬重量は 500g となっている。また、低減速比のギアと高トルクモーターにより関節に柔軟性を与えている。同様のモータユニットは中国企業 Steadywin も製作／販売している。いずれも構成部品をユニット化することにより、ロボットの低価格化を実現している。

空気圧駆動の柔軟ハンド

空気圧によって変形する高分子材料の袋を利用した柔軟ハンドは、学会等で数多く発表されているが、耐久性等の問題から実際に販売されているものは少ない。米国企業 Soft Robotics の空気圧駆動の柔軟ハンド mGrip⁸⁾ は、柔軟なポリマー材料により袋形状の指を構成し、袋内部の空気圧を増減させることによる変形を利用したロボットハンドである。多様な形状の対象物体を把持可能であり、食品工場の製造ライン等で利用されている。

吸着パッドを用いた把持

吸着パッドは、対象物面とパッドの間で発生する負圧を利用した把持方式であり、多くの対象物に利用できる。ポリマー製のパッド部分はベローズ状で柔軟であるため、対象物との接触時に衝撃を和らげる効果がある。しかし、吸着パッドは多くの場合 1 個のみ利用され、重心位置が予測と異なる場合には、対象物が傾斜して吸着できない状況が発生する。さらに、対象物の質量の増加にともなってパッドの弾性値と対象物の質量で決まる固有振動数が低くなり、運動時に振動現象が発生し易い。これも対象物落下の原因となる。Right Hand Robotics のエンドエフェクターは、最初に吸着パッドを伸縮させて物体を剛体ハンド内部に引き込ん

でから、ハンドで把持することで確実な把持を実現している⁴⁾。剛体ハンド部の一部に柔軟材料を用いることで、把持の安定性に寄与している。また、機械学習により様々な物体の把持を可能としている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

中国

中国は、ロボット応用大国からイノベーション大国への転換を図っており、国家政策「中国製造2025」(2015)において、重大推進10大産業の1つとして「高性能NC工作機械とロボット」を挙げ、国産産業用ロボットの国内市場シェア70%以上、減速機など中核部品の国産化率80%以上、世界トップ5社に1-2社をランクインさせる、共働ロボットなど次世代製品開発と実用化、等の目標を掲げている。

北京で開催された「2017世界ロボット大会」において「ロボット産業イノベーション発展路線図」が発表され、2025年までに北京にグローバル新興ロボット産業イノベーションセンターの構築を目指すという戦略を示した。戦略目標として、「2025年までに北京ロボット産業の収入約600億元を達成し、世界で先頭に立つロボット技術協同イノベーション体系を形成する。」「人工知能等の分野で世界をリードし、操作システム及びソフトウェアは国際のトップレベルを達成し、基本的に世界をリードするロボットイノベーション応用基地の建設を完成する。」としている。

日本

NEDO 革新的ロボット研究開発基盤構築事業

多品種少量生産現場をはじめとするロボット導入があまり進んでいない領域にも対応可能な産業用ロボットの実現に向け、産業用ロボットにおいて重要な要素技術の開発を推進している。要素技術として、ロボット動作計画の簡便化に資するデータベース構築等を目指した「汎用動作計画技術」、各種センシング技術を搭載したエンドエフェクター等の開発を目指した「ハンドリング関連技術」、次世代の通信技術を活用し、視覚、力覚、音声等を用いた「遠隔制御技術」、駆動部や構造部の軽量化の実現を目指した「ロボット新素材技術」の4つの研究開発項目を掲げている。事業期間は2020年度から24年度までの5年間である。

(5) 科学技術的課題

剛柔可変化

ロボット関節やエンドエフェクターを柔軟にすることにより、機械的接触をより容易にし厳密なキャリブレーションを不要とする柔軟ハンド等が実用化されている。一方、柔軟化によって、正確な操作、高速応答、大きな把持力の発生等が困難となる。産業用ロボットのさらなる汎用化に向けて、作業に応じて剛柔を可変とするロボットが求められる。エンドエフェクターの剛柔可変化の例として、ジャミンググリッパーが挙げられる。これは、柔軟で気密性を有する袋に粉体を詰めたロボットハンドである。通常このハンドは柔軟であり、把持する物体にあわせて粉体が流動し自由に形状を変えることが出来るが、内部の空気を抜くことでハンドの形状が固定され、複雑な形状の物体や脆弱な物体を安定に把持できる。Empire Robotics Inc.よりVERSABALLとして一時市販化された。ジャミンググリッパーの課題は耐久性が低いことである。また、高温の物体や尖った物体の把持も課題である。今後、ジャミンググリッパーの実用化に向けた膜材料や粉粒体材料の改良に加え、新たな剛柔可変機構の検討も望まれる。

把持・操作の汎用化

製造業の自動化における残された最後の分野として、ロボットハンドによる汎用的な操作（general manipulation）が挙げられる⁹⁾。また、ロボット分野の技術ロードマップ“Roadmap for US Robotics：From Internet to Robotics”（2016）では、産業用ロボットにおける将来の技術イメージとして、人間の手に近い触覚アレイと卓越した動的パフォーマンスを持つ高複雑度の手により、手全体を使って物体を把持・操作でき、人間の作業者が使用する道具を器用に操作できるロボットハンドを挙げている。この実現に向けた要素技術として、Robotic Materials Inc.が開発したロボットハンドEye-in-handは、視覚センサーを用いた近接覚により操作力を最適化し、硬いグリップパーでも果物などの柔らかい物体も潰さずに把持・操作することが可能としている。

軽量化・低価格化

従来型のロボットは、可搬重量に対する自重が大きく取り扱いが困難であったが、CFRPなどの新しい材料利用によるロボットの軽量化が、安全性の向上や利用容易化に繋がると期待される。これまでは、価格の増大に見合うだけの軽量化のメリットが見出されず、自動車等に比べるとロボットの高分子材料などの軽量材料の利用割合は小さかったが、3Dプリンタ普及による軽量材料加工の容易化、低価格化により、この問題解決に資すると期待されている。また、ロボットシステムのプラットフォーム化等による低価格化により、従来はコストの問題からロボットが導入できなかった産業現場にもロボットが普及し、労働生産性の向上が期待される。

(6) その他の課題

ものづくり分野では、既存技術の延長型の技術と新しい技術の2つの技術開発が必要となる。特に既存技術では解決が困難な課題に対しては、基礎技術まで立ち返った上での新しい技術開発が求められる。このためには、大学における基礎研究を活用しつつ、産学が連携して研究を推進する体制の整備が重要となる。また、材料、デバイス、システム、AIなどとの分野横断的な研究も有用ではあるが、やみくもに異分野との連携を推進するのではなく、ものづくり分野における潜在的課題からのニーズを分析し、その根幹の問題を明確にしたうえで、解決のために必要となる基礎研究を特定することが必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	学会等での研究発表は多く、一定の研究者人口を有している。
	応用研究・開発	○	↘	ものづくり分野のロボットとして産業用ロボットの需要は拡大傾向ではあるものの、新しいロボットの事業展開は進んでいない。
米国	基礎研究	○	→	AI、ロボットの研究活動は活発であり、海外からも研究者が集まっている。
	応用研究・開発	◎	→	Right hand robotics、Blue roboticsなどベンチャー企業が急速に立ち上がり、事業化の機会が多い状況を生み出している。
欧州	基礎研究	○	→	EU Horizon2020において基礎研究としての成果が出ている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツを中心に Franka Emika など次世代の産業用ロボットの事業化が始まっている。

中国	基礎研究	○	↗	AIに加えて、中国の強みの物づくり分野で、モータやギアなどロボットの要素技術開発が急速に進展している。
	応用研究・開発	◎	↗	先端技術を習得した人材が、高仙機器人、UBTECH、Syrius、GEEK、Mech Mindなど多くのベンチャー企業を設立して、事業化を開始し、人件費の高い日本を市場と捉えている。
韓国	基礎研究	○	→	ハードとソフトの両面で、基礎研究成果が出ている。
	応用研究・開発	△	→	斗山ロボティクスが全軸トルクセンサー付きロボットを2019年に発表し、官民協力してロボットのベンチャー企業育成を図っている。
その他の国・地域 (台湾)	基礎研究	○	→	研究者人口は多くないが、基礎的な研究成果が出始めている。
	応用研究・開発	○	↗	HIWINは駆動部品や制御技術を充実させて、主要な産業用ロボット機種をすべて製造販売している。TechMan Robotの人協働ロボットが日本でも販売を開始されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野 2.3.5）

参考文献

- 1) 国際ロボット連盟（IFR）報告書”World Robotics 2020 Industrial Robots”
- 2) ZDT（ゼロダウンタイム），ファナック株式会社
<https://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/function/zdt.html>
- 3) “Deep Learning for Robots：Learning from Large-Scale Interaction”，Google AI Blog, 2016
<https://ai.googleblog.com/2016/03/deep-learning-for-robots-learning-from.html>
- 4) RightHand Robotics, Inc.
<https://www.righthandrobotics.com/>
- 5) Franka Emika GmbH
<https://www.franka.de/>
- 6) “Meet Blue, the low-cost, human-friendly robot designed for AI”，Berkeley News, 2016
<https://news.berkeley.edu/2019/04/09/meet-blue-the-low-cost-human-friendly-robot-designed-for-ai/>
- 7) INNFOSS（Beijing）Technologies Co., Ltd
<https://innfos.com/>

8) The mGrip system

<https://www.softroboticsinc.com/products/mgrip/>

9) Nikolaus Correll, “Robots Getting a Grip on General Manipulation”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS2020)

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス