

2.2.1 制御

(1) 研究開発領域の定義

本領域はロボットの制御に関わる研究開発領域である。ロボットの制御とは指令生成により入力を決め、環境の変化を外乱として検出し、その外乱に対する修正項を入力に反映させて目的である出力を得るように速度と力を制御することである。制御の三要素である入力、外乱、出力があるシステム構成になっているという意味ではロボット制御系は特別なものではない。しかし、目標が単純な位置決めだけではないこと、環境の変化に対する動作修正も単純なロバスト性の追求で終わらないこと等は通常の制御システムとは異なり、環境の変化に適応するための自律性をも含んでいるのが特徴である。

(2) キーワード

位置決め制御、環境適応動作、感覚統合、動作データ駆動制御、自律判断、機械学習による直間制御、人間協調ロボット、超精密位置決め、位置と力の指令合成、遠隔制御、ネットワークロボティクス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本領域の意義は、従来のロボットの制御方式である位置決め制御から、環境適応能力のある目標達成型ロボットの制御に進化させることで、ロボットの利用できるシーンを広げ、労働人口の減少などわが国の課題を解決する手段の一つになることにある。制御の目的は与えられる指令を高速かつ高精度に達成することである。従来は、指令としてロボットやワーク¹の「位置」が重要視され発展を遂げてきた。その結果が現在の産業用ロボットアームや工作機械・加工機である。この取り組みは重要であり、大量生産における歩留まりの向上から、半導体の微細化プロセスの実現まで、現代の社会発展に多大なる貢献を果たしてきた。

一方で、人々のQOL (Quality of Life) の向上に向け、ニーズは多様化し、従来の大量生産体制から多品種少量生産への転換期を迎えている。また、主要先進国では労働人口の減少が喫緊の課題であり、その解決策の一つとして人とロボットの協調、もしくはロボットによる人の代行が期待されている。しかし、工作機械の詳細なプログラミングに対する費用対効果や、人や作業対象に対する安全性の観点から、従来の位置決め制御に重きを置いたシステムは必ずしも最適とは言えない。そのため、今後の制御という研究開発分野においては、単に位置を高速・高精度に制御するといった考え方ではなく、タスクの実現といった定性的な目標をいかにして制御的に達成するかという考え方が必要となり、その中でも人や対象など環境への適応能力の獲得は非常に重要な要素となる。

[研究開発の動向]

• 非定型かつ複雑な作業の実現を目的としたロボットの自律性

工場などで用いられている産業用ロボットは決められた環境下で決められた動作を寸分違わず繰り返すことを目的としており、言い換えれば自律性が皆無なロボットと言える。このようなロボットは、環境変化に対する適応力が非常に低く、ロボットが設置されている周辺環境はもとより、ロボットが扱う作業対象の、わずかな変化にも対応できず、作業に失敗する。これに対し、ある程度の融通をきかせるという視点からロボットに自律性を持たせる、という試みがある。作業対象の個体差が大きいといった、非定形で複雑な作業の実行には、人間が行うような柔軟な動きと環境適応能力が必要不可欠である。ここで必要なのは、人の持つ柔軟さをいかにして実現するかといった身体的な要素と、人の持つ感覚的な知識をいかにして定量化するかといった

1 加工対象物 (ワークピースの略)

知的な要素の2点に集約される。人の持つ柔軟さを実現する分野としてソフトロボティクスが注目を浴びているが、一方で、人の持つ感覚的な知識の定量化には、人の行う動作のサイクルを全てデータとして取得・実装する手法を確立しなければならず、本領域における喫緊の課題となっている。

• 省人・省力化と安全性が両立する人との作業における遠隔制御

ロボットの制御に関する研究の目的のほとんどは、人々の仕事を代替、もしくは人々の能力を超越することにある。家庭での掃除・料理・洗濯などの家事、工場での組み立てやはめ合い、工事現場や災害現場などの人が入り込めない極限環境での作業、人手では不可能な超精密作業などさまざまなタスクをロボットが代替することが、QOLの向上や安全性の担保、作業の効率化などにつながる。その中でも、人々の仕事を代替するロボットの制御では、ロボットの安全性が担保される必要がある。元来、工場で作業を行うロボットはフェンスと安全装置により厳重に隔離され、人と物理的に距離を置くことで危害を加える可能性を最小限に抑えてきた。家庭で作業を行うロボットや人間と協働作業を行うロボットには安全性が担保必要である。安全性を担保する一つの手法が遠隔操作である。肉体と筋肉は、ロボットにアクチュエーターを搭載し、頭脳は遠隔地の人間に委ねる方式である。この手法では、人の判断によりロボットを駆動するため安全性は担保され（人間に委ねられ）、医療現場や工事現場などではすでに実応用がされている。遠隔操作の性能向上、簡易化、視覚・力触覚の統合が早急な課題となっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• モデル化が困難なシステムに対する人工知能の適応

制御分野では、ソフト・ニューマチック・アクチュエーター、エラストマー・アクチュエーター、油空圧アクチュエーターなど、高い出力重量比を持つアクチュエーターへの注目が増している。一方で、これらのアクチュエーターは非線形な動特性を有するため、一般的な線形制御器で高精度な制御を実現することは困難である。この問題を解決するために、モデルベースの非線形制御が提案されてきたが、モデルの精度が十分でない場合、性能が著しく低下してしまう。また、適応制御によりモデルの不確かさを補償する手法も取り組まれたが、適応制御はモデルの正確な関数形が判明している場合に最大の効果を発揮するものであり、上述したような解析的にモデル化が困難なシステムへの適用は不向きであった。そこで、近年では、ニューラルネットワークを始めとした人工知能を適用することで精密なモデリングを要せずにアクチュエーターの複雑な動特性を自動的に学習、制御器へ反映する学習型コントローラが提案されている。本取り組みは数多くの良好な結果を示しており、今後のさらなる発展が期待されている。

• 感覚情報を取り入れたロボット制御設計

ロボットが多種多様な環境において柔軟な動作を実現するには、人間が行うように五感情報を用いて環境や作業対象を認識し、動作軌道を生成・制御することが必須となる。感覚情報を制御に組み込むシステムとしては、ビジュアルサーボが最も一般的で、視覚情報を取り入れることで、作業対象へのアプローチや周辺環境との衝突回避が可能になる。衝突回避のための軌道生成は人間も意識して行っているために研究例も多く、画像認識や深層学習との組み合わせも検討されている。一方で、作業対象への微細な力加減の調整には力触覚情報を取得し、それを基に動作を修正する制御が必要となるが、このような制御の設計は人間が無意識で行っているという点もあり研究成果が十分でない。

• 安全安心を保証する制御方式

これからのロボットは人と共に作業を行うことが望まれている。位置制御により制御されるロボットは非常に硬く（融通が効かない）、予期せぬ環境と接触した場合にも位置指令値に合わせて強引に稼働しようとする

ため、対象の破損、ロボットの暴走を招く。この課題に対応するためには柔らかい制御が必要であり、さまざまな取り組みが行われている。接触状態を基にした力制御は不要な力をかけるのを防ぐように作用する。単なる力指令値を基にした電流制御ではなく、外乱オブザーバーや力センサーで計測された値に基づいて制御を行うことで、環境に適応した制御が可能である。力センサーではダイナミックレンジと小型化がトレードオフの関係にあるが、小型センサーで0.5gから100kgまでの計測が可能なセンサーが開発されている。さらなるダイナミックレンジの拡大と小型化が期待される。物理的に柔らかいソフトアクチュエーターの開発も行われている。ソフトアクチュエーターでは非線形性の補償、物理的に固い環境への適用などの課題が残っている。また、モーターのバックドライバビリティ（逆可動性）も必要であり、出力側（エンドエフェクター）に適当な力を加えたときに、それが入力側（モーター）に伝わり駆動する必要がある。バックドライバビリティを有したモーターの制御方式の検討も今後の課題である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• 日本：内閣府のムーンショットプログラム

ムーンショット目標3は、2050年までにロボット技術を活用した人とロボットが共生する社会を実現することを目的とした大規模プロジェクトである。具体的には、高齢者や障がい者の介護支援、建設現場での作業支援、災害現場での救援支援など、さまざまな分野でのロボット技術の活用を進め、人々の生活を支える社会を実現することを目指して研究開発が進められている。

• 米国：Boston Dynamics社

米国Boston Dynamics社は、4足歩行ロボットSpotや物流ロボットStretch、人型ロボットAtlasを開発・製品化しているが、いずれも、高度な歩行制御技術やバランス制御技術、ハイパフォーマンスアクチュエーター技術、機械学習技術などを組み合わせて、高い運動能力を示している。

• 中国：中国製造2025

2015年に公開された「中国製造2025」において、中国製造業を高度化し、世界的な製造業大国としての地位を確立するための重大推進10大産業の一つとして高性能NC工作機械とロボットが採り上げられており、製造業基盤能力の強化プロジェクトとして、『一頭の龍』応用計画が進められている。「一頭の龍」とは、中国の古代神話に登場する龍のことであり、製造プロセスにおけるさまざまな工程を一元管理するための総合的な生産管理システムを示す。

(5) 科学技術的課題

• サービスロボットや非定型作業に求められる「柔らかい動き」の実現

現在、社会で実動しているロボットの大半は産業用ロボットである。しかも、産業用ロボットが活躍している分野は、自動車産業を中心とした輸送機器製造分野と半導体産業を中心とした電子デバイス製造分野である。その他の製造業では、若年労働者不足や熟練作業者の枯渇という課題に直面していてもサービスロボットについてはその普及が始まったばかりである。JISのサービスロボットは「人又は設備にとって有益な作業を実行するロボット」という、定量的な評価ができない定義になっており、産業用ロボットと対比して議論するのは簡単ではない。サービスロボットへの期待は大きい一方、実現に向けては科学技術的な課題がある。

その課題の一つは、柔らかい動きの実現である。ロボットの制御性能に密接な関係があるにも拘らずこれまで深く考察されなかった。ソフトロボティクスや生物規範型ロボティクス（2.2.2「生物規範型ロボティクス」参照）と呼ばれる分野が注目される理由は、ロボットが持つ硬い動きを改善して環境適応性を向上させるためである。産業用ロボットの稼働台数が、輸送機器製造分野や電子デバイス製造分野に偏っている理由の一つである。

製造分野で大きく付加価値を付けている産業の一つに食品産業がある。この分野では形が不定で柔らかい食材を扱う作業事例が多く、ロボットの導入が難しい分野である。一般に、形が不定形で柔らかい、あるいは、脆弱な対象を扱う作業は、非定型作業に分類され、人手に頼っているのが現状である。これに対し、定型作業では作業対象の位置や形が決まっており、位置決めができれば作業が完遂できるのでロボットが導入しやすい。定型作業では位置決めに基づく「硬い」動きによる作業が必要で、位置決め制御に基づく産業用ロボットで作業が完遂できるのに対し、サービスロボットや非定型作業に求められているロボットは「柔らかい」動きと作業対象に適應する能力が求められていると考えてよい。課題は以下の3点に分解できる。

①作業目的を定量化してその達成が数値的に評価できるシステムの確立

指令値の生成システムをこれまでの位置決め制御から脱却して、求められている作業を完遂するための速度と力の指令値を生成するシステムを開発すること

②柔らかい動きの定義と制御による実現方法の確立

柔らかい動きを実現する力制御を含む総合的な制御方法の開発

③作業対象に適應するために必要な情報の取得方法の確立

作業対象や作業環境の情報（画像情報や力触覚情報など）を取得して動作指令を修正して適應するシステムの開発

①は入力の合成法、②は制御システムの設計、③は外乱による動作修正システムの設計になる。③に関しては、AI等を利用したロボットの自律性が発揮される部分であり、新たなチャレンジである。この部分は人間の動作では潜在的な意識による運動であり本能的とも言える部分に相当する。このような暗黙知的な信号処理は定量化できないと考えられてきたが、最近の研究で数値データとして扱うことが可能になってきているという報告もある。結果として、柔らかい動きで、作業対象に適應しながら非定型作業を遂行するサービスロボットあるいは産業用ロボットの実現が夢ではなくなっている。

また、これまで位置制御と力制御が並立的に議論されてきたが、統合していかなくてはならない。上記の課題は、これまでのロボットの制御を統合して、環境情報を動作に反映させる道筋が見えてきたことを意味している。

(6) その他の課題

・学界・行政におけるシーズ技術のeasy-to-use化と産業界のニーズとの整合

ロボットが高等教育機関で一般に教えられるようになったのは1980年以降である。標準的な教科書であるR. Paulの“Robot Manipulators”が1981年にMIT Pressから発刊された。1980年はロボット元年と言われる年で産業ロボットが誕生したと無関係ではない。しかし、その後の学界の研究成果とその産業への展開は成功しているとは言いにくい。一例として、研究初期の段階で盛んに研究された計算トルク法は産業ロボットにはほとんど搭載されていない。H^{*}制御も同様である。前者は典型的なフィードフォワード制御であり、後者は高いロバスト性を獲得するためのフィードバック制御である。これら二つの制御方式が取り入れられない理由は、計算プロセスが複雑であるにもかかわらず、期待するほどの性能が得られないからである。また、力制御の要求仕様が明確ではなく上記のプロセスと整合しないことも原因である。

産業用ロボットは、位置決めが主たる制御性能評価の対象であったため、数値制御工作機械のサーボ機構を取り入れた。実際に先端軌跡を直線と円で補間することで十分な精度が得られていたのである。また、位置決め、あるいは軌跡追従制御においては、自律性や知能性が必要となることは少なく、制御に関しては速度制御を基本とする制御性能以上を必要としなかった。特にPTP (Point-to-point) 制御と言われる始点と終点のみを指定する制御では、各軸の運動がその軸だけで補間（これには低次の代数方程式で近似するスプライン近似などが用いられている）されており、先端の軌跡に関しては特段の性能要求はない（人のような

柔らかい動作を実現するといった需要が多くなかった)。また、CPC (Continuous Path Control) 制御と言われる軌道追従制御ではオペレーターがティーチングペンダントを用いて、実際のロボットを少しずつ動かしながら軌跡をあらかじめ教示するが、この作業が膨大で、かつ教示軌跡の変更が容易ではないため、さらなる制御の高度化に向かう動機付けがなかったためでもある。

少子高齢化と若年労働者の不足は、ロボットの高度化への要求になっており、人間の代理の役割が求められるようになった。米国のTesla社が人型ロボットを発表し、視覚情報を従来ロボット制御に組み入れることで工場労働者を代替させると主張した。人間の代理をするロボットが希求されていることは確かである。しかし、このようなロボットの実用化は従来の制御技術の延長線にはなく、全く新しい発想が必要である。特に、力制御に関する革新が求められているのに対して十分なシーズ技術が育っていない。また、このようなシーズ技術を保護し産業界に展開するシステムが存在しない。学界と産業界が遊離している状況が革新的な技術を生む機会を逸していると考えられる。

学界でこのようなシーズ技術が育ってこない理由の一つに産業界のニーズを拾い上げる機会が少ないことが挙げられる。ロボット関係の国際・国内学会や学術集会においても、産業界からの参加者が少なく人的交流も希薄である。産業界で求められている革新的な技術は何かを把握しないことには、学界からの提案があってもすれ違いに終わってしまう。また、学会から発信される情報は抽象的でどのように実現するかという道筋が示されていないことも多い。産業界、特に中小企業では、手っ取り早く性能を評価したいという傾向が強く、新規な制御技術を見つけて育てる余裕がない。ロボットメーカーは顧客の要望と自分の技術をマッチングさせるだけで、その要望の中に含まれている新規技術への期待に応えることはなく、結果的に中小企業や民生でのロボット導入が進まない原因となっている。

このような不整合問題を解決するためには、産業界だけではなく民生や農業あるいは福祉介護といった人手のかかる産業における技術的なニーズを把握し、そこから抽出した課題を大学や国研などの学界にフィードバックする仕組みが必要である。その多くは、実はロボットの動きに柔らかさを求めている点にある。生物模倣制御やソフトロボティクスへの期待は、ロボットにおける柔らかい動きへの要求があるからで、このような共通した課題を個別の課題に落とし込むのではなく、その中の基本課題を抽出してシーズ技術として確立すべきである。

技術の管理と運営に学界と官界が果たす役割は大きい。産業界、特に中小企業では設置してすぐに作動するロボットを希求しており、教示作業や事前環境認識などを期待することが難しい。easy-to-use化が今後のロボットに必要である。多くの場合、人の動作の代替がロボット導入の動機である。ティーチングペンダントに代わって人の動作を簡単に移植できる新しい教示システムの確立が必要になっている。ロボット本体の制御だけではなく、ロボットの制御入力信号取得にも技術革新を必要とする課題がある。これらの技術を集めて知財を管理し、かつロボットのeasy-to-use化により産業界と学界を橋渡しする役割を担う行政機関ないしは行政システムが望まれる。

(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	○	↘	内閣府のムーンショットプログラムやImPact、科学技術振興機構の未来社会創造事業など、ロボット制御を根幹とするプロジェクトの推進に力が入れられているが、COVID-19の影響で研究予算の削減もされており、やや状況としては懸念される。
	応用研究・開発	○	→	ロボット制御分野における産学連携取り組みの発表が増加傾向にあり、大学と企業の協力体制強化の結果が出始めている。また産業用ロボットメーカー各社から協働ロボットがリリースされており、人とロボット共存への取り組みに力が入れられているが、世界的には若干出遅れている。

米国	基礎研究	○	↗	潤沢な研究予算を基に、ヒューマノイドロボットやマイクロドローンなど、非常に繊細かつ高速な動的応答性が求められる分野において目覚ましい成果が多数報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Boston Dynamics 社による4足歩行ロボットの販売、ヒューマノイドロボットのレンタルが開始されるなど、応用範囲の拡大が期待されている。またサンフランシスコで自律制御によるパトロールロボットが試験的に導入されるなど、実社会運用に向けた行政の協力体制も整っている模様である。最近ではTesla社が工場労働者を代替するというヒューマノイドロボットを発表したが詳細は未公開である。
欧州	基礎研究	○	↘	官民パートナーシップであるSPARCは2020年までに6億ユーロを財源とするロボティクス・イノベーション・プログラムであり世界的に見てもトップクラスの財源であった。カメラ情報を基に動作を生成する研究やソフトロボティクスに関する研究が多く報告されている。スイス、ドイツの研究機関からの文献が多いが、発表文献は減少傾向にある。
	応用研究・開発	◎	↗	スイスに本社を置くABB社、ドイツのメーカーであるKUKA社（中国の美的集団の傘下）など世界有数のロボットアームメーカーがあり、海外拠点も複数あり共に日本にも拠点がある。ますますの発展が期待される。
中国	基礎研究	◎	↗	IEEEでのMotion Controlを題材とした論文では中国発のもの割合が非常に増えている。
	応用研究・開発	◎	↗	国家プロジェクト「製造業基盤能力の強化プロジェクトの重点製品、製造工程『一頭の龍』応用計画」にてロボット用コントローラを扱う企業を対象とした金融機関からの支援の実施など国を挙げての活動が見られる。
韓国	基礎研究	○	→	Motion Controlを題材とした論文の数はそれほど増えておらず、現状維持にとどまっている。
	応用研究・開発	◎	→	斗山ロボティクス社による6軸協働ロボットが日本市場での販売を開始するなど、国外に向けた活動も見られる。
カナダ	基礎研究	○	↗	トロント大学を中心に近年、発表文献は増加傾向にある。特にビジョン情報を基に対象の推定や軌道の生成を行う研究が多く報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	世界有数のロボットアームメーカーであるKinova社、ロボットアームをカスタムする部品を製造、販売するRobotiq社などがありトレンドは上昇傾向にある。Magna社はロボットが郊外を走るピザのデリバリーを始めなど社会への普及も進められている。2010年頃の財政危機の影響で資金調達が難航していたが、近年は財政が安定し発展が期待される。

(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

参考文献

- 1) 大岩孝彰, 勝木雅英「超精密位置決め専門委員会：超精密位置決めにおけるアンケート調査：精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査」『精密工学会誌』86 巻 10 号 (2020) : 735-740., <https://doi.org/10.2493/jjspe.86.735>.
- 2) Scott Kuindersma, et al., "Optimization-based locomotion planning, estimation, and control

- design for the atlas humanoid robot,” *Autonomous Robots* 40, no. 3 (2016) : 429-455., <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3>.
- 3) Ryo Sakurai, et al., “Emulating a sensor using soft material dynamics: A reservoir computing approach to pneumatic artificial muscle,” in *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* (IEEE, 2020), 710-717., <https://doi.org/10.1109/RoboSoft48309.2020.9115974>.
- 4) Sung-Woo Kim, et al., “Force Control of a Hydraulic Actuator With a Neural Network Inverse Model,” *IEEE Robotics and Automation Letters* 6, no. 2 (2021) : 2814-2821., <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3062353>.
- 5) 西川開, 黒木優太郎, 伊神正貫「調査資料-312 科学研究のベンチマーキング2021 : 論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況 (2021年8月)」文部科学省 科学技術・学術政策研究所, <https://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-RM312-FullJ.pdf>, (2023年3月7日アクセス) .
- 6) Robert Penicka, et al., “Learning Minimum-Time Flight in Cluttered Environments,” *IEEE Robotics and Automation Letters* 7, no. 3 (2022) : 7209-7216., <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3181755>.
- 7) Amirhossein Kazemipour, et al., “Adaptive Dynamic Sliding Mode Control of Soft Continuum Manipulators,” in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (IEEE, 2022), 3259-3265., <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811715>.
- 8) Wenyuan Zeng, et al., “LaneRCNN: Distributed Representations for Graph-Centric Motion Forecasting,” in *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (IEEE, 2021), 532-539., <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636035>.
- 9) Zhaocong Yuan, et al., “Safe-Control-Gym: A Unified Benchmark Suite for Safe Learning-Based Control and Reinforcement Learning in Robotics,” *IEEE Robotics and Automation Letters* 7, no. 4 (2022) : 11142-11149., <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3196132>.
- 10) Ryuya Tamura, et al., “High Dynamic Range 6-Axis Force Sensor Employing a Semiconductor-Metallic Foil Strain Gauge Combination,” *IEEE Robotics and Automation Letters* 6, no. 4 (2021) : 6243-6249., <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093008>.
- 11) Jaehwan Kim, et al., “Review of Soft Actuator Materials,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 20, no. 12 (2019) : 2221-2241., <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00255-1>.
- 12) Shuangyue Yu, et al., “Quasi-Direct Drive Actuation for a Lightweight Hip Exoskeleton With High Backdrivability and High Bandwidth,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25, no. 4 (2020) : 1794-1802., <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2995134>.
- 13) CNN, “Watch the creepy horror film promotion that went viral,” <https://edition.cnn.com/videos/us/2022/10/01/smile-movie-actors-sporting-events-orig-jc.cnn/video/playlists/atv-trending-videos/>, (2023年3月7日アクセス) .

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス