

## 2.3.5 ロボット基盤技術

### (1) 研究開発領域の定義

人間が苦手な作業の代行や人間の能力を強化するように、人に寄り添いスマートな（賢い）ロボットを実現するための革新的な要素技術・基盤技術を開発する領域である。小型・軽量・高出力のアクチュエータ、小型・軽量・低価格のセンサ、自律・協調動作を可能とする人工知能、柔軟な動作が可能なソフトロボティクス、不測の事態に対応できる新たな制御技術、基盤技術を統合したモジュール開発、などの研究開発課題がある。

### (2) キーワード

サービスロボット、手術支援ロボット、Surgery 4.0、遠隔操作、ソフトアクチュエータ、人工筋肉、センサ、ソフトロボット、ソフトロボティクス、協調制御、自律制御、人工知能（AI）、機械学習、自己修復、フレキシブルエレクトロニクス、エレクトロハイドロダイナミクス、誘電エラストマー、デジタルファブリケーション

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

世界的な高齢化、医師を含む医療従事者の不足などから、診断や治療を支援するロボットシステムや介護リハビリを支援する機器の需要は今後ますます増加することが予想されている。また、最近の新型コロナウイルス感染症の広がりから、感染症対策として遠隔操作ロボットなどの活用も求められるようになってきている。このように少子高齢化・労働力不足が進むなかで、ロボット技術は従来のものづくり分野だけでなく、サービス分野、医療・介護、農林水産業、社会インフラ保守管理、災害救助などへの活用が期待される。これまで産業用ロボットで世界をリードしてきた日本にとっても、新たな応用分野に向けたロボット技術開発は非常に重要である。これらサービス分野も含めたロボット産業全体の市場規模は2035年には10兆円となり、例えば、手術支援ロボットだけでも2021年には2.5兆円に達すると予想されている。今後のサービス分野などの新たな応用分野では人間とより密接に関わることから、人に危害を与えない安全性とともに、人とのコミュニケーションなどロボットには高度な機能が要求されるようになる。これまでも、さまざまな応用分野へのロボット技術の導入をめざして国家プロジェクトが推進されているが、これらの活動を要素技術・基盤技術の立場から後押しし、今後発展が期待される分野で要求される性能・機能を満足する材料・デバイス、部品、モジュールを世界に先駆けて研究開発することは、ロボット技術で引き続き日本がリードしていくためにも重要である。このような要求への対応には、ロボットの主要分野であるメカニクスと、AIなどの情報科学（IT）やナノテクノロジー・材料など異分野間の技術の融合・統合による新たな要素技術・基盤技術の開発が不可欠である。

この研究開発領域では、医療分野でのロボットや、人間との共同作業や人間の支援を行うときに重要になるサービスロボット、ソフトロボットを例に、それらの実現に向けたロボットの要素技術・基盤技術として、駆動技術（アクチュエータ）、制御技術、センシング技術（センサ）、材料技術などがあるが、ここでは主にアクチュエータ、自律制御技術、材料技術について記載する。なお、ロボットにおいてはセンシング技術も非常に重要であるが、多種多様なことからここでは取り扱わないので、センシング技術の詳細については研究開発領域「MEMS・センシングデバイス」を参照されたい。

## 【研究開発の動向】

2次産業で利用されてきたロボット技術を医療分野やサービス産業へ展開するためには、複雑な動作ができる多関節アームなどに加え、ソフトロボット技術や人工知能（AI）技術など、ハードウェアからソフトウェアにまたがる様々な新しい技術が必要とされる。特に、人工筋肉のような新たなアクチュエータの開発、柔軟な体の位置や変形の検出、外部との接触の検知技術、柔らかい体や腕を精度良く制御するための制御技術、自立制御技術などの研究が活発になっている。ソフトロボットに関する厳密な定義はないが、柔らかい素材を用いた柔軟なメカニズムに関する研究から始まり、最近では柔らかさの概念拡張と分野横断型研究によって様々なタイプのソフトロボットが世界中で開発されている。これまでロボティクスでは、メカトロニクスや制御工学を基礎とした研究者らによって推進されてきたが、ソフトロボット研究では、材料工学、化学、物理学、生物学などの研究者らも含めた非常に広範な研究分野の研究者が関与して、分野融合・統合的な研究として発展させている。最近ではソフトロボティクスに関する独自の国際会議の開催、学術雑誌の創刊もされており、極めて注目度の高い学術領域となっている。2013年には、Soft Robotics Journalが刊行されており（2019年のIF=6.16）、2018年からIEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) が開催され、IEEEでの地位を確立しつつある。この会議では、材料やセンサ、アクチュエータなどの基礎技術について多くの発表があり、それを用いたモデル化や学習、制御、生物規範ロボティクスなども報告されていた。また、ウェアラブルや脚ロボット、グリッパなどの応用例もあり、「柔らかい」という接頭語がついてはいるがロボティクス全般に研究がいきわたっている。EuroEAPと呼ばれるヨーロッパで主に開催される電気駆動型高分子材料やセンサ、アクチュエータを扱う学会も2011年に発足し、その後活発に活動している。

医療用のロボットにおいても、ソフトロボット技術の利用が進んできている。例えば、米国Intuitive社は事前にCT画像から3次元の気管支内の挿入経路を計画するシステムを用いて、2019年に肺の気管支内の生検を実現する直径3.5 mmの柔軟構造体を用いた手術支援ロボットIonを発表している。また、欧州ではオランダのアイントホーフェン大学発のベンチャー企業が形成外科における血管縫合などのマイクロ手術を支援するマスタスレーブ型のロボットを開発し、CEマークを取得して2020年に初の患者での治療を実施している。

機械系のソフトアクチュエータとしては、古くから空気圧アクチュエータや流体アクチュエータがあり、1980年代には東工大の鈴森らによるゴムを用いたマッキベン型人工筋が開発され、最近の世界的なソフトロボットブームによってマッキベン型人工筋や空気圧で駆動する人工筋肉の研究開発が活発になっている。また、柔らかい素材の特性を活かしたソフトアクチュエータとして、高分子アクチュエータ（Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) アクチュエータ、電場応答性ゲルアクチュエータなど）や誘電エラストマーアクチュエータ（Dielectric Elastomer Actuator : DEA）も古くから知られている。高分子アクチュエータは電場に応答してイオンが動いて高分子膜やゲル膜が屈曲運動を生成するため、低電圧（数V）で駆動するが、湿潤な条件が必須となっている。一方、DEAは伸縮可能な電極によって誘電ゴムが挟まれたキャパシタ構造で静電力によって駆動するものである。この動作には一般に1 kV以上の高電圧が必要であるが、電流値は極めて小さく完全にドライな環境で駆動し、誘電ゴムにあらかじめ歪みを加えることで極めて大きな変形を実現することができる。そのため、デバイス系の研究者やロボットへ応用しやすいメリットがあり、多くの研究者がDEAの研究を進めている。なお、ソフトアクチュエータとは異なるが、国内ロボットメーカーでは、関節を柔らかく制御することによって柔らかい運動を実現し、人間と共存できるようなコ・ロボットの開発が進められており、そのためのトルク制御などの制御技術などに進展がみられる。

ここ数年のロボット自律制御の大きなトレンドとしては、「Deep Learningのロボット自律制御への積極的な利用」と「ロボットと人の協調制御の発展」がある。これまでも強化学習などの機械学習手法がロボット自

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

律制御に積極的に取り入れられてきたが、2018年以降、IEEE Robotics and Automation Society (RAS) の International Conference on Robotics and Automation (ICRA) で Deep Learning を利用したロボット自律制御手法がさかんに提案されるようになった。Deep Learning のロボット制御への応用の初期段階では、ドローンの姿勢制御やセンサ値の解析、細胞のマイクロマニピュレーション、脳内血管を回避しながらの脳内への管子挿入制御など、さまざまな角度からの利用が試みられた。このような数年間の多岐にわたるトライアルを経て、Deep Learning に代表される機械学習がロボット自律制御に適用できる場面が明確になりつつある。機械学習が自律制御に活きるのはロボットの運動制御そのものではなく、比較的安定で変化の少ない周囲の環境下で状況を判断して動く方向や条件を自律的に決定する、という使い方である。一方、模倣学習や姿勢・運動制御のようにリアルタイム性が求められる対象に対しては、Deep Learning や強化学習に限らず、機械学習を用いたアプローチははまだ研究段階である。その最大の理由は、周囲環境の不確実性への対処が根底にあり、いわゆる「開かれた環境」への対処は機械学習でもいまだ乗り越えられていない大きな問題として残っている。

もう一方のトレンドである「人とロボットの協調制御」では、高齢者や障がい者の運動補助ロボットやリハビリテーションロボットの発展がみられる。EU で CYBATHLON と名付けられた障がい者補助ロボットを用いたスポーツ大会が開かれるなど、その活動が世界的な中心となりつつあり、義手・義足、外骨格ロボットなどを利用して対象者・病院・研究機関・企業が一体となった取り組みが積極的に進められている。このように人とロボットが協調して動作する部分自律 (Partial Autonomy) がよりさかんになってきている。また特筆すべき点として、ロボットの部分自律制御をより最適に行うために人の運動制御原理を理解するという研究が工学・ロボット制御の視点からさかんに進められている。RAS の Technical Committee (TC) on Human Movement Understanding などの活動もあり、人の運動制御の理解が深まることで、人の動きと親和的にロボットを制御する技術は一層進展することが期待される。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

ソフトロボティクスに関する新技術分野の1つとして、3Dプリンタ (付加製造法)、レーザカッター等を含むデジタルファブリケーションがあげられる。例えば、複数の材料を3次元造形可能なマルチマテリアル3Dプリンティング技術が2019年にNature誌に掲載され、硬さの異なる部品を3Dプリンタで設計して、アクチュエータとボディを一体化した構造を作製し、移動できるソフトロボットのデモンストレーションに成功している。これらの技術によって、センサ、アクチュエータ、配線を埋め込んだデバイスの設計が可能になる。プリントできる素材などの改良も進み、従来の付加製造法では問題であった材料の強度も徐々に改善され、構造部材なども付加製造によって作り出すことができるようになった。一方、付加製造特有の精度確保や機構設計法、あるいは材料的な考察は続いており、付加製造のためのマニファクチャリング工学の確立がまたれる。特に、ソフトロボティクスとしては高分子材料などの柔らかい素材をどのように安定に活用できるかが重要である。

ソフトアクチュエータについても新たな技術が出てきている。DEAについては、精密作製プロセスとエラストマーの薄膜化技術の統合によって低電圧化に成功し、自律駆動できるセンチメートルサイズの移動ロボットが報告されている。柔軟な機構の概念をさらに拡張するために、化学や物理学を背景とした仕組みが研究されている。例えば、Jamming 転移 (砂のような粉体が固体や流体のように振舞う性質) を利用し、どのような形状にもフィットできる Jamming Gripper が研究されている。空気圧を用いた人工筋肉の研究がデジタルファブリケーション技術と融合してさかんに行われているが、空気圧を生成するポンプは大きくて

重いためシステムが肥大化し、騒音が大きいため用途が限定されている。これに対し、最近、電気流体力学 (ElectroHydroDynamics: EHD) と呼ばれる物理化学的な現象を用いたソフトポンプが報告された。このソフトポンプは伸縮可能な電極とエラストマーで構成され、ポンプ内には誘電性液体が満たされている。電極近傍で生成するイオンが電界によって加速され、結果として誘電液体が運動する。このポンプとアクチュエータが一体化した構造を設計し、完全に電気駆動できる流体駆動型の人工筋肉をデモンストレーションし、ウェアラブルデバイスへの応用展開も示されている。このように物理化学的な変化を活用することで、これまでのメカトロニクスを基礎としたロボティクスになかった新しい展開が起こりつつある。

AI技術とソフトセンサ、アクチュエータに関する融合研究も報告されつつある。例えば、空気圧人工筋に導電性材料を組み込むことで、センサ機能を付与した人工筋をブリヂストンと東京大学の研究グループが開発している。人工筋を構成するゴムにヒステリシスや非線形性とリカレント型ニューラルネットワークの学習法の一つであるリザーバーコンピューティング (Reservoir Computing) を組み合わせることで、極めて精度良くリアルタイムに変位を推定することに成功している。外部に変位センサを取り付けることなくデバイスを設計できることが期待される。

IEEE Soft Robotics 学会では、無限次元を持つ柔らかいロボットをどのようにモデル化し、制御するか、について多くの発表がある。特に、近年は進展が著しい学習法をソフトロボットのモデル化や制御に使おうという動きが活発化している。また、ロボット自律制御の観点では、ソフトロボティクスの制御原理確立の議論が注目される。従来の一般的なロボット制御ではモデルベース制御がその基本であったが、モデル化が難しいソフトロボットの制御では新しい制御概念の構築が必要である。これまでは、Deep Learningなどの機械学習を用いてそれぞれのデバイス・環境に合わせた手法で制御器を開発することが多かった。しかし、統一された制御概念確立の必要性がRASのTechnical Activity Board Meetingでも指摘されるなど、ソフトロボットの普及には必須であり、さまざまな方面からその確立に向けた議論が進められている。

手術支援ロボットについては、徐々にではあるが実用化されつつある。国内では2019年5月に、通常の鉗子を挿入して現状の低侵襲な外科手術を遠隔に実施できるマスタスレーブ型ロボット「The Senhance Surgical System」(TransEnterix) が国内で薬事承認を得て、埼玉医科大学に導入されている。また、2019年6月に人工股関節全置換術を支援し、海外ではすでに多くが導入されているロボットMAKOが日本で保険適用となり、今後の国内での普及が注目される。海外の事例としては、2019年10月に英国CMR surgical社のコンパクトな手術支援ロボットVerisusのインドの病院への導入、2019年6月にオランダPreceyes社が眼科手術支援用のマスタスレーブ型ロボットのCEマーク取得、機能的脳疾患の手術(定位脳手術)を補助する医療ロボットKYMERO(2016年にKoh Young Technologyと延世セブランス病院が共同開発)が2年間の臨床試験を終えて2020年8月から臨床の現場に導入、2020年3月に韓国国内で承認を受けた人工関節手術ロボットCUVIS-jointを韓国CUREXO社がインド最大のインプラント企業Meril Healthcare社に最小で53台を輸出する契約締結、などがある。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

米国では、2018年にNSFがContinuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) という領域を設定し、総額2千万ドルで10個の学際融合チームに実質2019年から4年間付与される。2020年のIEEE RoboSoftの実行委員長がC3 SoRoの研究代表者であり、開催地が米国であるということも関係しているが、この会議では口頭発表60件のうち半数以上の31件が米国からの発表であり、このプロジェクトが米国におけるソフトロボティクスの推進に大きく貢献している。

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

EUでは、Horizon 2020により多くのロボット研究が支援されている。ソフトロボット関係では、SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation (2015年～)、Self-Healing Soft Robotics (Future and Emerging Technologies (FET) プログラム、2019年～) などがある。手術ロボット関係では、EDEN2020 (低侵襲脳神経手術ための統合技術プラットフォーム、2016～2020年)、SMARTsurg (手術支援ロボットプラットフォーム、2017年～)、SARAS (AIによるロボット手術支援、2018～2020年) などがある。義肢・外骨格ロボット関係では、SoftPro (義手・リハビリテーションのためのシナジーベースのオープンソース基盤・技術、2016～2020年)、CYBERLEGS++ (ロボット義足・外骨格、2017～2020年)、MyLeg (埋め込み型の筋電ロボット義足、2018～2021年)、Xosoft (ソフトな生体模倣外骨格、2018年～) などがある。また、さまざまな外骨格ロボットや義肢を共通の環境で評価するための試験場を作り、そこで実験を行うことで世界標準規格の作成をめざしている Euro Bench プロジェクトのように、新規技術のベンチマークや標準作成そのものがプロジェクトになっているものもある。さらに、脳活動のロボットへの応用として、EUのHuman Brain Projectが脳科学の成果をロボットへ積極的に転用する動きが進んでいる。

中国では2011年の12回目の5年計画においてロボットを重点分野と位置付けて以来、活発に研究開発が行われており、「ロボット産業発展計画 (2016～2020年)」の象徴的な10製品のなかに、手術支援ロボットが明記されている。これらにより、Beijing Medical Robotics Industry Innovation Center (IMC) などの政府主導によるR&Dセンターが設置されている。

韓国は今後5年間で総額1.2兆ウォンの予算を投入する大型医療機器開発プロジェクト「凡部處全周期医療機器研究開発事業」が行われる。手術ロボットだけではなく、手術支援用ロボットには人工知能融合という条件付きのものが多い。

日本では、ロボット技術の研究開発と社会展開に向けた各府省のさまざまなプロジェクトが立ち上がっている。要素技術開発を目的としたものとしては経産省の「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」(2015～2022年度)がある。ソフトロボット関係では、異分野の若手研究者がソフトロボット学を構築する試みとして、科研費新学術領域「ソフトロボット学の創成:機電・物質・生体情報の有機的融合 (代表:鈴木康一)」(2018～2022年度)が推進されている。身体拡張に関するものでは、JSTのERATO「稲見自在化身体プロジェクト」(2017～2022年度)があり、ウェアラブルロボットを利用した身体拡張の研究が進められている。手術ロボット関係では、AMEDの「高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業」(2020年～)が開始され、遠隔での手術支援ロボットの実証研究とガイドラインの策定などを行っていく。また、内閣府のムーンショット型研究開発制度により、「ムーンショット目標3:2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」が設定され、自律制御技術などの革新的な技術開発により人と共生するロボットの実現をめざして2020年度から開始される。

### (5) 科学技術的課題

ソフトロボット研究において検討すべき課題の1つとして、束縛されていないソフトロボット (Untethered soft robots) の構築があげられる。これは、ソフトアクチュエータを駆動させる技術の多くが空気圧などの流体アクチュエータとポンプを基礎としているためであり、Nature Electronics誌においてレビュー論文が書かれ、その重要性が議論されている。完全に電気駆動型のDEAやEHD等のソフトアクチュエータ技術をさらに発展させつつ、積極的に物理化学現象を活用し新技術を探索することも重要である。

自己修復可能な材料などを含むソフトロボット研究に適した材料開発も必要である。ロボットに適用することを考えると、材料の機械的特性に着目されがちであるが、自己修復能力を含めた化学的特性、センサとして

用いるための電気的特性など複数の面から材料の特性を評価し、目的に合った材料を新たに開発することがソフトロボティクスの技術シーズとして求められる。また、新たな材料を用いた構造設計も重要であり、特にここ数年進歩の速い3次元プリンティングなどの付加製造法を用いることなども考えておく必要がある。柔らかさの設計法として、自然界でうまくいっている形態を模倣する生物模倣型設計も重要であり、目的とする機能を実現するために生物がどのような形態を利用しているか、それをどのように模倣するかなど考える必要がある。

環境に煩雑さの残る開かれた環境での自律制御は依然として重要な未解決な問題として残っている。Deep Learningといった機械学習によるBig Dataをもとにした最適化では、時々刻々と変化するような環境の煩雑さには対応できないことも明確になってきた。この糸口としては人の運動制御原理の理解が役に立つ可能性があり、今後ロボティクスの視点から運動制御原理の解明が進むことが期待される。また、部分自律における課題としては「主体感」の問題がある。人とロボットが協調する際、人が「ロボットに動かされている」、「ロボットに合わせている」という感覚が強くなってしまうとロボットと協調することが人にとって大きなストレスになりかねない。このため、人とロボットの協調では、自分で動いているという主体感を強く持てるようなシステムにしていく必要がある、工学的な技術だけでなく医学的・心理学的なアプローチと融合しながら技術を確立していく必要がある。

### (6) その他の課題

日本国内では先駆的にソフトロボットが研究されていたが、現在は欧米や中国が研究の中心となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米ではDARPAやNSF、ヨーロッパではEUなどから継続的な大型研究費の支援がなされていることが背景となっている。わが国においても、ソフトロボティクスのような萌芽的分野への先行的な投資を促す施策や、若手研究者らの独立した研究環境を提供することなど、継続的な研究支援が望まれる。

今後、ロボティクスは遠隔診療や再生医療などの医学分野、テレワークなどを利用した分散社会の実現やインフラの整備点検といった新しい街づくり、自動運転や自動仕分けなどを用いた流通分野、など多岐にわたる分野での活躍が期待される。そのため、研究の段階から分野をまたいだ議論を行い、ロボット自律制御に求められる機能など、新たな基盤技術として求められるものをあぶりだす必要がある。また、その中で各技術分野のバックグラウンドを持ちつつ、異分野の知識を吸収しその可能性と限界を見据え、それらの活用を考えられるような若手の育成が必要である。

### (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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトロボット開発や人の運動制御原理の理解にもとづく部分自律などの概念が作られている。</li> <li>ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大している。</li> <li>2020 IEEE Soft Roboticsでは口頭発表の10/60を占めた。</li> <li>新学術領域ソフトロボット学が立ち上がっている。</li> <li>遠隔操作への期待が高まっており、AMED 高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業が開始された。</li> </ul>

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ S-muscle 社、SoLARIS 社、株式会社イノフィス等の大学発ベンチャーが登場している。</li> <li>・ 各ロボットメーカーより、さまざまな協働ロボット (コ・ロボット) が発表されている (2019 国際ロボット展)。</li> <li>・ 医療応用や Human Augmentation の分野での応用利用が期待される。</li> <li>・ 海外ではさまざまな手術支援ロボットが実用化あるいは実用段階に入っているなかで、わが国の動きはやや弱い。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大し、質の高い論文も多い。</li> <li>・ NSF C3 SoRo Project が推進され、IEEE Soft Robotics では口頭発表の半数 (31/60) が米国からである。</li> <li>・ Harvard 大学では多数の異分野融合プロジェクトが立ち上がっている。</li> <li>・ Lewis らのファブリケーションに関する研究が目立つ。</li> <li>・ マイクロ・ナノロボット、ソフトロボットの開発が活発。医療ロボットや AI などこれまで通り多数の研究発表がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Harvard 大学の研究グループのメンバーらが Soft Robotics Inc. を設立し、物流分野に参入。</li> <li>・ Soft Robotics Inc. はソフトグリッパと AI によって様々な形状の物体をピックアップすることをコア技術とし日本へも展開している。</li> <li>・ 自律制御に関しては、基礎的なものよりも応用とリンクした研究がさかんである。</li> <li>・ アカデミックな分野にはあまり出てこないが、軍事応用はかなり進んでいるようである。</li> <li>・ 米国 Intuitive surgical 社が、肺の気管支内の生検を実現する柔軟で細径なロボット Ion を開発した。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Horizon 2020 における様々なプロジェクトにみられるように、ロボットに関する基礎研究が継続して行われている。</li> <li>・ 英国、イタリア、ドイツ、スイスの順で学術論文が多く出版されており、質の高い研究を展開しつつある。</li> <li>・ SHERO プロジェクトなどが推進されている。</li> <li>・ 英ブリストル大学ソフトロボティクスセンターで研究が進んでいる。</li> <li>・ 基礎的な研究成果の応用への展開が早い。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 応用技術の世界標準にしていく動きが強く、応用プロジェクトと標準化プロジェクトが同時に走っている。</li> <li>・ 英国 CMR のロボット Verisus の開発が進んでいる。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ソフトロボットに関する基礎研究の学術論文が約 70% 占め、学術論文は指数的に増大している。</li> <li>・ 目立った動きはないが、Soft Robotics Journal に中国発の論文が増加している。</li> <li>・ 動物実験に対する倫理規定の低さから、脳神経系の活動に関する基礎的な実験も多い。</li> <li>・ 医療ロボット関連の論文数の増加が示すように、5G を用いた遠隔操作や AI を活用したものなど活発に研究が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コ・ロボットに関しては、DLR など研究が進んでいる。</li> <li>・ 5G などの通信や画像処理といったソフトウェア分野での応用は積極的であるが、自律制御に関しては応用分野では目を見張る成果はあまりない。</li> <li>・ 手術支援ロボット関連のベンチャーだけでも多数存在している。整形外科や低侵襲外科領域でのロボットの開発がさかんである。</li> </ul>

2.3 俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ソフトロボット開発などの基礎研究は進んでいる。またICRA開催に立候補するなど、基礎研究拡大に積極的である。</li> <li>・ソウル大学ではKyu-Jin ChoらがHuman-Centered SoFT (Soft robotic Future Technology) Centerを設立している。</li> <li>・DGIST-ETH Microrobotics Research Centerにおいて、マイクロロボットの研究が行われ着実に成果をあげている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ソウル国立大学ロボティクスセンターでは、ウェアラブルロボットに関する研究が進んでいる。</li> <li>・人工関節手術ロボットCUVIS-jointが韓国内で実用化され、インドでの販売展開など着実に成果をあげている。</li> </ul>

(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

- ・ソフトロボティクス（システム・情報分野 2.2.1）
- ・生物規範型ロボティクス（システム・情報分野 2.2.2）
- ・生活支援ロボット（システム・情報分野 2.2.7）
- ・MEMS・センシングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.4）

### 参考・引用文献

- 1) K. Suzumori, S. Iikura and H. Tanaka, "Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms", *Proceedings, 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1991) : 1622-27. doi : 10.1109/ROBOT.1991.131850
- 2) Y. Osada, H. Okuzaki and H. Hori, "A polymer gel with electrically driven motility", *Nature* 355, no. 6357 (1992) : 242-244. doi : 10.1038/355242a0
- 3) R. Pelrine et al., "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%", *Science* 287, no. 5454 (2000) : 836-839. doi : 10.1126/science.287.5454.836
- 4) M. A. Skylar-Scott et al., "Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing", *Nature* 575, no. 7782 (2019) : 330-335. doi : 10.1038/s41586-019-1736-8
- 5) X. Ji et al., "An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators", *Sciences Robotics* 4, no. 37 (2019) : eaaz6451. doi : 10.1126/scirobotics.aaz6451
- 6) E. Brown et al., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 44 (2010) : 18809-18814. doi :



10.1073/pnas.1003250107

- 7) V. Cacucciolo et al., “Stretchable pumps for soft machines”, *Nature* 572, no. 7770 (2019) : 516-519. doi : 10.1038/s41586-019-1479-6
- 8) R. Sakurai et al., “Emulating a sensor using soft material dynamics : A reservoir computing approach to pneumatic artificial muscle”, *Proceedings of 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* , (2020) : 710-717. doi : 10.1109/RoboSoft48309.2020.9115974
- 9) S. I. Rich, R. J. Wood and C. Majidi, “Untethered soft robotics”, *Nature Electronics* 1, no. 2 (2018) : 102-112. doi : 10.1038/s41928-018-0024-1
- 10) N. Mohajerin, M. Mozifian and S. Waslander, “Deep Learning a Quadrotor Dynamic Model for Multi-Step Prediction”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2018), [http://ncfrn.mcgill.ca/members/pubs/2017\\_ICRA\\_Grey\\_Box\\_model.pdf](http://ncfrn.mcgill.ca/members/pubs/2017_ICRA_Grey_Box_model.pdf)(2020年12月8日アクセス)
- 11) A. Segato et al., “GA3C Reinforcement Learning for Surgical Steerable Catheter Path Planning”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2020). doi : 10.1109/ICRA40945.2020.9196954
- 12) N. Sünderhauf et al., “The limits and potentials of deep learning for robotics”, *International Journal of Robotics Research* 37, no. 4-5 (2018) : 405–420. doi : <https://doi.org/10.1177/0278364918770733>
- 13) J.M. Tom et al., “First-in-human robotic supermicrosurgery using a dedicated microsurgical robot for treating breast cancer-related lymphedema : a randomized pilot trial”, *Nature communications* 11, no. 1 (2020) : 757. doi : 10.1038/s41467-019-14188-w
- 14) 下田他 「人に主体感を持たせるロボットによる運動補助」『日本AEM学会誌』 27巻4号(2019) : 412-418. doi : <https://doi.org/10.14243/jsaem.27.412>

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用