

2.2.1 ソフトロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

環境変化に対する適応性は、生物の最も重要な特徴の1つであり、生物の身体が有する柔らかさはそこに大きく寄与していると考えられる。ソフトロボティクスは、このような柔らかさに注目し、従来の「硬い」ロボットが苦手とする環境への適応を実現するロボティクス分野である。生物的な柔らかさを実現する技術の確立と、柔らかな適応的知能の実現に向けた理論の構築が本研究開発領域における重要な両輪と考えられる。

(2) キーワード

柔軟材料、柔軟センサー・アクチュエーター、身体的知能、生物規範ロボティクス、ウェアラブルロボット、流体アクチュエーター、柔軟関節、力覚・触覚センサー、脚ロボット、人協働ロボット

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

工場などの生産現場で使われている産業用ロボットなどの「硬い」ロボットは、高精度が要求される作業や、作業の繰り返しを得意としており、工場のような整備された環境下では効率よく動くことができる。しかしながら「硬い」ロボットは環境変化に対する適応性が低く、環境から予想外の干渉がある場合には、作業実現率が低下してしまう。また、過大な力を発生し、環境を破壊したり自らを破壊したりする場合もある。一方、柔らかい体を持つ人間などの生物は、高精度の繰り返し作業は苦手であるが、環境の変化に柔軟に対応し、作業を遂行することができる。このような適応性は、知能を構成する重要な要素であると考えられ、柔らかい身体によって適応的、知的な振る舞いを作り出し、人間に匹敵する知的なロボットを作ることができると期待される。

柔らかい身体によって知的な振る舞いを生み出す機序とともに重要なのは、生物的な柔らかさを実現する技術の確立である。これまでのロボットは、金属やプラスチックなどの硬く、加工法が確立されている材料で構成されている。一方、ロボットにどのような柔らかい材料を実装するのかについて、そしてその実装の方法論については、まだ確立していない。近年、急速に普及が進んでいる各種の3次元プリンティング技術や、生物から抽出したり、培養したりすることによって作成された生体部品を使う方法など、これまでにロボットにおいて検討されていなかった新しい実装方法を開発する必要がある。

応用としては、硬いロボットが安全上、人間と干渉しないように使われていたのに対し、人間と作業環境を共有する人協働ロボットや、人間が直接装着して動きをアシストしたりするウェアラブルロボットやアシストスーツなど、人間と柔らかく干渉することができる特性の利用に注目が集まっている。

[研究開発の動向]

ロボットに弾性を導入することは、フィードバック制御におけるゲインの上限を下げることとなり、制御の精度を上げようとする場合、不利に働く。これに対して、最初にアクチュエーターに直列弾性を導入することを提案したのは、MIT人工知能研究所のロドニー・ブルックスらである。ブルックスは1986年にロボットを構成する各モジュールが自律的に処理を行うことで、全体として大きな適応性を実現するというサブサンプリングアーキテクチャーを提唱した。これによって昆虫並みの知能は実現できるが、それを人間並みのロボットにスケールアップすることはできないだろうとするマーヴィン・ミンスキーとの議論を経た後、直列弾性アク

チューター駆動のヒューノイドロボット¹⁾を作り、知能的な振る舞いを実現しようとした。しかしその後、柔らかいロボットは複雑な動特性を持つ制御対象として扱われることはあっても、知能研究の対象としては、一旦姿を消す。

一方で、マーク・レイバート（現ボストンダイナミクス）は、1980年代に直列に空気圧シリンダを備えた一脚、多脚のロボットを作り、柔らかさを利用することで、制御周期の遅いコンピューターでも瞬間的な制御の必要な跳躍や走行をコントロールできることを示し、圧倒的なパフォーマンスを実現した²⁾。その後もボストンダイナミクスにおいて、さまざまな脚ロボットを開発し、歩行ロボット技術を先導している。しかし、柔らかさが計算を代替するという新たな知能研究への展開や、ソフトロボティクスという新しい分野の確立にはつながらなかった。

ソフトロボティクスというキーワードが学会誌に現れたのは、日本ロボット学会誌1999年9月号「ソフトロボティクス」特集号である³⁾。「非構造環境下で不可避免的に発生する外乱を受け入れ、人間との接触において安全なロボットの設計を目指し、様々なソフトな要素、アクチュエーターを慎重に選択し、ロボットの機構に組み込む方法、さらに、その機構に適用する制御系の設計法」、「『メカニカルなソフトネスの導入』は、非構造環境下で働くロボット、あるいは人間と共存するロボット等を設計、製作するための必須条件である」といった記述があり、人間との柔らかい相互作用、あるいは安全、安心が焦点であったことがみとれる。

1990年代終わりから、チューリッヒ大学のロルフ・ファイファーを中心に、身体性という考え方が人工知能の分野で台頭してくる^{4), 5), 6)}。身体性の本質をひとことで説明することは難しいが、「知的なロボットの振る舞いは、身体の構造と制御、そして環境のダイナミクスの相互作用の結果生み出される」というのが基本的な考え方である。「コンピューターがいかに高速になろうとも、相互作用を考えずに制御のみで知的な振る舞いを生み出すことは難しい」と言い換えてもよい。ファイファーが主張したのは、身体の構造から生み出される形態学的計算が、コンピューターによる形式的計算と組み合わせたり、環境と相互作用することで、知的振る舞いが生み出されるという点である。

2000年以降、生物規範ロボティクスについての研究がカリフォルニア大学バークレイ校、スタンフォード大学で進んでいる。ゴキブリロボットのロコモーション⁷⁾や、イモリの足部機構とその機能に関する研究によって、生物を模倣した柔らかさの設計が、知能的振る舞いを生み出すために重要であることを示した。生物規範ロボティクスでは、生物の形態をそのままコピーをするのではなく、形態の持つ機能をよく解析して、その機能をコピーするべきであると主張している。すなわち、生物の柔軟構造が持つ機能を十分に理解し、人工物によってそれを再現することで、柔らかさを機能的に利用したソフトロボットを実現することができる、ということである。

一方、米東海岸のMITやハーバード大学では、異なった観点から、ソフトロボティクスの潮流が生じている。2008年から2010年にかけてハーバード大学のジョージ・ホワイトサイズが、米DARPAによるChemBotsプログラムを主導した^{8), 9)}。ChemBotsでは、化学的あるいは流体力学的（Hydrostat、ハイドロスタット）な駆動による柔らかいアクチュエーターの開発、という観点からソフトロボットにアプローチしている。ホワイトサイズによると、このプログラム自体から非常に新しいものが生まれたわけではないが、このプログラムに参加していた研究者は、その後、MITやハーバードを中心にソフトロボティクスの大きな流れを作り出した^{10), 11), 12)}。この研究の流れは、その後、Soft Robotics ToolkitやeGaln（Gallium-Indium eutectic、共晶ガリウムインジウム）を用いた柔軟なセンサー開発へと発展した¹³⁾。ハーバード大学では、非常に小さいサイズで柔らかい羽根を持つ飛翔ロボットであるRobo-BEE¹⁴⁾や、化学反応を利用した回路を持つタコロボット¹⁵⁾など、多くのソフトロボットが開発されている。タフツ大学のバリー・トリマーらは、イモムシの構

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

造や運動を解析し、その動きを実現するような柔らかいロボットを開発している^{16), 17)}。ソフトロボティクスのもっともわかりやすい機能は、環境への適応性、コンプライアンス（機械工学におけるコンプライアンスではなく、本来の字義的な「なじみ」という意味でのコンプライアンス）である。ソフトロボティクスに関するもっとも古い解説記事の一つでは「静水圧を用いた無限次元のなじみこそがソフトロボティクスであり、超多自由度ロボットはそれに該当しない」と、ソフトロボティクスにおいて無限次元の柔らかさが重要であるという言及をしていて興味深い¹⁸⁾。同様の考え方はホワイトサイズの解説記事にも表れている⁸⁾。柔らかいアクチュエーターとして、既に紹介した空気圧人工筋や、流体エラストマーを用いたアクチュエーターなども開発されている。粉粒体の特性を利用したジャミングハンドも、コンプライアンスを利用したソフトロボティクス研究の事例として挙げられる。

2005年から2009年まで実施された特定領域研究「移動知」（領域代表：浅間一（東大））では、生物やロボットの身体性に注目し、身体、脳、環境によって振る舞いを生み出す原理についての研究が行われた。ソフトロボティクスの身体性において生物を模倣する必然性は存在しないが、創発される相互作用を設計するための一般論が存在しないなかで、柔らかさを活用したロボットを設計する指針の一つとして生物の構造を参考にすることができる。2010年には、身体性関連の研究者によって、ソフトロボティクスワークショップが東京大学で開かれた。これは「ソフトロボティクス」をどう定義したらよいかを考える日本初の会議である。ソフトロボティクスを直接定義するのではなく、むしろ、定義を模索することでソフトロボティクスを広くとらえ、何らかの意味で柔らかいロボットを研究している研究者をできるだけ取り込んで、大きな流れを作ろうとしていた。

ヨーロッパにおける、もっとも初期のソフトロボティクス関連プロジェクトは、オクトパスプロジェクト（FP7-ICT 2007.8.5, FET Proactive, 2009-2013）である。当初は、特にタコの触手の流体力学的な性質に着目し、タコの触手の構造を解析して、柔らかい触手の工学的なモデルを作ることを目的としていた、その後、触手の柔軟な構造がもつ計算能力に着目し、柔らかさに潜む身体的知能研究の先鞭をつけている。オクトパスプロジェクトは、そのPIであったセシリア・ラスキにより、ソフトロボット関連の研究者の共同研究プロジェクトであるRoboSoft（FP7-ICT-2013-C project # 619319）へと発展している。

ヨーロッパにおける生物模倣とは異なる流れとして、ソフトロボティクスを柔軟なアクチュエーターの持つ特性ととらえ、関連する研究者を取り込んで分野を発展させようという動きもあった。2014年フラウンホーファー研究機構のワークショップがドイツで開かれ、関連する研究者がその後寄稿して作られた予稿集が“Soft Robotics”の題名で刊行されている¹⁹⁾。このワークショップには、VIActorsプロジェクト（FP7, 2009-2012）で、直列弾性アクチュエーターや、可変弾性アクチュエーターを開発した研究者らも参加している。これはMITで開発された直列弾性の考え方を引き継ぐものである。

（現在の潮流）

ソフトロボットの隆盛を受け、2013年には、Soft Robotics Journalが刊行された²⁰⁾。また、前述の2010年に東京大学で開かれたワークショップは、IEEE Technical Committee “Soft Robotics”の最初のイベントであった。その後、ソフトロボティクスTCは成長を続け、先に挙げたRoboSoftを母体に、2018年には第一回IEEE International Conference on Soft Robotics（RoboSoft）がイタリアで開催され、第二回（2019年）は韓国ソウルで、第三回（2020年）は米イェール大学（オンライン）で開催されている。ソフトロボットは分野としての地位を確立しつつあるといえる。第三回（2020年）RoboSoftの研究キーワードは、現在のある程度の学術的なトレンドを示していると考えられるので、ここに列挙しておく（頻度順）：

Soft Robot Materials and Design, Soft Sensors and Actuators, Soft Robot Applications, Modeling, Control, and Learning for Soft Robots, Biologically-Inspired Robots, Wearable Robots, Hydraulic/Pneumatic Actuators, Compliant Joint/Mechanism, Force and Tactile Sensing, Legged Robots, Grippers and Other End-Effectors。材料、センサー、アクチュエーターなどの要素技術に関する多くの発表があり、それを用いたモデル化、学習、制御、そして生物規範ロボティクスが続いている。注目すべきは、ウェアラブルや脚ロボット、グリッパなどの応用例である。「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広がっているといえる。米国では、NSF EFRI Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) が発足し、ソフトロボット研究を推進している。韓国では、2016年より韓国研究財団 (NRF) による理工分野の基礎研究事業として、ソウル国立大学にソフトロボティクス研究センターが設立され(センター長、キウジン・チョウ)、次世代ソフトウェアラブルロボット技術を中心に研究開発が進められている。日本では、2018年より科研費新学術領域「ソフトロボット学」(領域代表：鈴木康一(東工大))が発足し、生物、材料、ロボティクスという異なる分野の融合的研究によってソフトロボット学を確立しようとする試みがなされている。日本国内の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、柔らかい運動ができて人間と共存できるような人協働ロボットの開発が進んでおり、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。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

自己修復可能な材料

EUのHorizon 2020において、自己修復可能な柔らかい素材についての研究 (Self-Healing Soft Robotics, A Horizon 2020 FET Open Project) が進められている。自己修復能力は、工学にとって一つの大きなベンチマークである。このプロジェクトでは、特殊な材料をロボットの部品として用いることで、自己修復を可能としている。また、新学術領域「ソフトロボット学」では、生体細胞を材料としたロボットを作る試みがなされており、細胞の成長を利用した自己修復技術に発展することが期待される。

新規材料開発

ソフトロボットのための新規材料開発が活発になりつつある。前出の自己修復可能な材料のほか、液体金属のeGaln、各種の高分子ゲル、シリコンなどが柔らかいロボットの素材として試されてきている。ソフトロボット材料は、加工性と安定性といった相反する特性をバランス良く持つことが重要である。また後述の付加製造技術の進展により、柔らかい～固い、導電性～誘電性といった材料特性が、場所によってシームレスに変化する傾斜機能材料が創出されており、ロボットの設計自由度の向上につながる技術として期待されている。

Additive manufacturing (付加製造)

近年の3次元プリンターの普及により、これまでの(切削などの)除去による造形ではなく、付加によって造形を行う付加製造技術に注目が集まっている。3次元プリンター材料の改良が進み、構造部材などの強度が要求される部品が付加製造によって造形できるようになってきた。一方で、付加製造特有の精度確保手法、機構設計法、材料に関する検討は引き続き行われており、付加製造のためのマニファクチャリング工学技術の確立が望まれる。特に、ソフトロボティクスにおいては、高分子材料などの柔らかい素材をどのように安定に加工できるかがカギとなる。また、付加製造によって生体材料を生体組織に直接プリントするという手法の研

究が始まっている。生体材料の場合には、生体親和性と、製造後の成長を考慮した設計法など、これまでに考えられなかった問題点が浮上しつつある。また3次元形状を造形するだけでなく、成長、劣化、自己修復などの造形後のさらなる形状変化まで予め設計に組み込む4次元造形技術（4Dプリンティング技術）にも注目が集まりつつある。

モデリングと制御

IEEE RoboSoftでは、無限次元の自由度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数の発表が行われている。特に近年は、進展が著しいディープラーニングなどの機械学習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。またモデル予測に基づくトルク制御を用いて高い踏破性を示す四脚ロボット（これもトルク制御によって柔軟性を実現したソフトロボット技術の一種といえる）など、アメリカを中心に脚ロボット（特に四脚ロボット）の研究が進んでいる。脚ロボットにおけるモデリングは、無限次元のモデリングに比べて幾分シンプルではあるが、シンプルな制御であるがために非常に素早く適応的な運動を生み出すことができる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

NSF, Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo)

米国NSFは、EFRI Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) を立ち上げ、ソフトロボット研究を推進している。10個の学際融合チームに対し、総額2千万ドルが2019年から4年間配分される。2020年のIEEE RoboSoftでは、口頭発表60件のうち半数以上の31件がアメリカからの発表であり（参考までに、日本は10件、イギリス4件、イタリア3件と続く）、このプロジェクトが、アメリカにおけるソフトロボティクス研究の推進に貢献していることが見て取れる（かなりの数の論文が、NSFのサポートに言及している）。

新学術領域「ソフトロボット学」

日本では、2018年より新学術領域「ソフトロボット学」が立ち上がっており、生物学者、材料研究者、ロボット学者がチームを作って研究を進めている。生命現象のプラットフォームである有機体に特有の「やわらかさ」に注目し、生物学・情報科学・物質科学・機械工学・電子工学が有機的に融合したサイエンスであるソフトロボット学の創設を目指している。

山形大学・ソフトマターロボティクスコンソーシアム

産学連携による機能性有機材料研究コンソーシアムを形成し、「ソフト機能材料・デバイス」、「ソフトセンシング」、「ソフトメカニクス」、「ソフト蓄電デバイス」の4テーマから、有機材料の極限機能の創出を目指している。さらに、人・モノ・情報・人工知能をソフトにつなぐ「ソフトマターロボティクス」への発展を目指している。

Self-Healing Soft Robotics, A Horizon 2020 FET Open Project

EUのHorizon 2020において、人工機能材料、スマートセンシング、アクティブアクチュエーションと制御機能をソフトロボットに統合し、完全自律型自己治癒ソフトロボットデバイスを開発することを目的としている。受動的および能動的な治癒メカニズムを含む材料システムとスマートな感覚機能の組み合わせは、より信頼

性が高く持続可能な製品の実現に寄与すると考えられ、自動車産業、航空宇宙産業、海運産業、エネルギー生産、製造業、建設業などに革命をもたらす可能性があり、社会全体での応用が期待される。

ソウル国立大学ソフトロボティクス研究センター

2016年から2022年までの7年間、韓国研究財団理工分野の基礎研究事業の一環として設立された（センター長、キュウジン・チョウ教授）。韓国の国家戦略ロードマップの中核技術と位置づけられるヘルスケア技術とAR・VR技術を基礎にき、次世代ソフトウェアラブルロボット技術を開発し、急速に成長しているウェアラブルロボット市場の先行的独占を目指している。このために、（1）ソフト知能と生体力学に基づいて着用性／利便性が改善されたソフトウェアラブルロボットの設計、（2）変形と曲げが大きい状況で、ロボットの状態推定が可能なソフトセンサーとソフトセンサーアレイの開発、（3）マシンラーニングベースの着用者の意図／作業状況の把握とウェアラブルロボット制御アルゴリズムの開発を目標としている。

（5）科学技術的課題

ソフトロボティクスに関する研究のさらなる進展を可能とするための重要な課題として、ソフトネスプロダクション（柔らかさをどう設計・実現するか）、そしてソフトインテリジェンス（柔らかさをどう適応性に結び付けるか）の2つが挙げられる。

【ソフトネスプロダクション：柔らかさをどう設計・実現するか】

柔らかさを活かした様々な材料開発が必要である。前述の自己修復材料に加え、eGalnといった液体金属による配線と有機半導体によるソフトセンサーによってソフトロボットの表面に高密度の触覚センサーアレイを構成することが期待される。また、エラストマーや導電性高分子を用いたソフトアクチュエーターの創出も期待される。このように、ソフトロボット材料には、機械的特性のみならず、自己修復能力を含めた化学的特性、成長する細胞を利用するための生体親和性等の生物的特性、導電性、誘電性といった電気的特性など、複数の面から素材の特性を評価し、新たな可能性のある素材を開発することが求められる。

これらの素材を活用して、センサーと構造材料の一体化、アクチュエーターと構造材料の一体化、造形後の形状変化・成長等を取り込んだ新たなロボット設計の方法論の構築が求められる。新たな設計の方法論として、自然界でうまくいっている形態を規範とする、生物規範型設計が強力なツールとなると期待される。ロボット工学において従来から生物模倣という概念が用いられてきたが、新たな材料特性を取り込んで柔らかさを設計するにあたって、皮相的な模倣に留まらず、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本質的な理解に基づく、生物を規範とした設計が求められる（2.2.2 生物規範型ロボティクス参照）。

さらに、新たな製造技術の開発も必要となる。前述の付加製造技術に加え、センサーアレイの実現に向けて、マイクロマシニング、CVD、ソフトリソグラフィ、ナノインプリント等のマイクロ／ナノスケールの製造技術の確立が求められる。また、成長する細胞を利用するためには、これまでほとんど研究が進んでいない生物材料（つまり細胞）のプリントと培養方法の開発が求められる。このような材料開発、設計方法、製造技術の実現に向けて、ロボット分野、化学分野、材料分野、生物分野の研究者からなる分野融合的な取り組みが重要となる。

【ソフトインテリジェンス：柔らかさをどう適応性に結び付けるか】

化学・材料・生物分野との融合を通じて得られた新たな材料の特性を生かし、いかにしてロボットの適応性を生み出すかが重要となる。身体が柔らかいだけでも、ある程度の適応性（コンプライアンス）は実現できる、しかし四脚ロボットの例にもあるように、柔らかい身体（制御を含む）を作れば、モデル予測制御によって安定な歩行を生み出すことができるなど、柔らかいダイナミクスを実現することで、制御を簡素化、有効化する身体性の活用が、全体システムとしてのロボットの適応性を大きく前進させることになる。また、生物模倣に基づいたロボットを試作するという構成論的アプローチによって、柔らかさが知能にどのように寄与しているか解明することにつながる。これは、生物がどのように適応的振る舞いを生み出すかといった生物分野における課題に対する寄与も期待される。さらに、柔らかい身体非線形ダイナミクス自体を計算機構として取り込んだリザーバコンピューティングは、新たなソフトインテリジェンスのあり方として期待される。

(6) その他の課題

ソフトロボティクスは、ロボット学、材料、化学、生物など複数の分野にまたがる学際的研究であり、複数の分野の連携が必要不可欠である。ロボットにおける従来の異分野連携は、ロボットの仕様を決めると、それに応じて材料の仕様が決まり、その仕様を満たす材料を探す、といった様に他分野とは「仕様」を通してのみのコミュニケーションに限定される場合も多かったが、ソフトロボティクスの場合には、材料自体の特性がロボットの機能に直結しているため、異分野とのより密な情報交換と連携が必要となる。例えば、材料系の研究者がロボットに求められる機能を実現するための候補材料を提供し、それをもとにロボット研究者が知能の実装方法を考え、再び材料の検討に戻るといったフィードバックが常に行われることが求められる。そのために各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ながら自分の分野での活用を考えられるような若手の育成が、ソフトロボティクスにとって重要である。

さらに産学連携も重要である。ソフトロボティクスの代表的な出口は、ウェアラブルロボットと人協働ロボットである。特に人協働ロボットに関しては、これまでの精度・速度優先の産業用ロボットを見直し、人間と共存しながら、かつ環境変化に適応的な事例を示していくために、産学連携は非常に重要になると考えられる。

(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	○	→	新学術領域「ソフトロボット学」や山形大学・ソフトマターロボティクスコンソーシアムにて基礎研究が推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、日本からの口頭発表数は10/60である。
	応用研究・開発	○	↗	各ロボットメーカーより、柔軟性を取り込んださまざまな人協働ロボットが発表されている（2019国際ロボット展）
米国	基礎研究	◎	↗	NSF C3 SoRo Projectが推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、半数以上（31/60）の口頭発表が米国よりされている。
	応用研究・開発	◎	↗	NSF C3 SoRo Projectが推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、半数以上（31/60）の口頭発表が米国よりされている。
欧州	基礎研究	○	→	SHEROプロジェクト、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
	応用研究・開発	◎	↗	人協働ロボットに関しては、DLRなどで研究が進んでいる

中国	基礎研究	○	↗	目立った動きはないが、Soft Robotics Journalにおいて中国発の論文が増加している
	応用研究・開発	○	↗	目立った動きはないが、Soft Robotics Journalにおいて中国発の論文が増加している
韓国	基礎研究	○	→	特に目立った動きはない
	応用研究・開発	△	↗	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

(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) Pratt, Gill A., and Matthew M. Williamson. "Series elastic actuators." Intelligent Robots and Systems 95.'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 1. IEEE, 1995.
- 2) Raibert, Marc H. Legged robots that balance. MIT Press, 1985.
- 3) Dragomir Nenchev, 「ソフトロボティクス」特集について, 日本ロボット学会誌, 17巻, 6号, 1999.
- 4) 石黒章夫, 小林宏, 細田耕監訳, 「知の創成」, 共立出版, 2001年11月.
- 5) 細田耕, 石黒章夫訳, 「知能の原理」, 共立出版, 2010年3月.
- 6) [review] Pfeifer, Rolf, Max Lungarella, and Fumiya Iida. "The challenges ahead for bio-inspired'soft'robotics." Communications of the ACM 55.11 (2012) : 76-87.
- 7) Cham, Jorge G., et al. "Fast and robust : Hexapedal robots via shape deposition manufacturing." The International Journal of Robotics Research 21.10-11 (2002) : 869-882.
- 8) [review] George M. Whitesides, Soft Robotics, Angew. Chem. Int. Ed. 2018, 57, pp. 4258-4273,
- 9) [review] Ilievski, Filip, et al. "Soft robotics for chemists." Angewandte Chemie 123.8 (2011) : 1930-1935.
- 10) Annan Mozeika, Erik Steltz, and Heinrich M. Jaeger, The First Steps of a Robot Based on Jamming Skin Enabled Locomotion, the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.408-409, 2009.

- 11) Soft Robotics Toolkit, <https://softroboticstoolkit.com/>
- 12) Marchese, Andrew D., Robert K. Katzschmann, and Daniela Rus. "A recipe for soft fluidic elastomer robots." *Soft Robotics* 2.1 (2015) : 7-25.
- 13) Park, Yong-Lae, Bor-rong Chen, and Robert J. Wood. "Soft artificial skin with multi-modal sensing capability using embedded liquid conductors." *Sensors*, 2011 IEEE. 2011.pp.81-84.
- 14) Wood, Robert J. "The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect." *IEEE transactions on robotics* 24.2 (2008) : 341-347.
- 15) Wehner, Michael, et al. "An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots." *Nature* 536.7617 (2016) : 451.
- 16) Trimmer, Barry A. "New challenges in biorobotics : incorporating soft tissue into control systems." *Applied Bionics and Biomechanics* 5.3 (2008) : 119-126.
- 17) H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot : a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot.," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, p. 026007, 2011.
- 18) [review] Trivedi, Deepak, et al. "Soft robotics : Biological inspiration, state of the art, and future research." *Applied bionics and biomechanics* 5.3 (2008) : 99-117.
- 19) Verl, A., Albu-Schäffer, A., Brock, O., Ratz, A. (Eds.) , *Soft Robotics*, Springer, 2015.
- 20) [editorial] Barry A. Trimmer, *A journal of Soft Robotics; Why Now?*, *Soft Robotics*, Vol. 1, No.1, pp.1-4, 2013.