

令和3(2021)年度 新学術領域研究（研究領域提案型）（継続の研究領域）研究計画調書

令和 2年11月 2日
2版

研究区分	公募研究	機関・領域・研究 項目・整理番号	34315-8003-B02-0001				
研究課題番号	-						
研究領域	領域番号	領域略称名					
	8003	ソフトロボット学					
研究項目番号	B02						
研究代表者 氏名	(フリガナ)	ヒライ シンイチ					
	(漢字等)	平井 慎一					
所属研究機関	立命館大学						
部 局	理工学部						
職	教授						
研究課題名	ウェットコンタクトの力学と粘滑物ハンドリングへの応用						
研究経費 〔千円未満の 端数は切り 捨てる〕	年度	研究経費 (千円)	使用内訳(千円)				
			設備備品費	消耗品費	旅費	人件費・謝金	その他
	令和3年度	4,898	938	2,900	400	270	390
	令和4年度	4,465	505	2,900	400	270	390
	総計	9,363	1,443	5,800	800	540	780
最も関連の 深い小区分		(1)			(2)		
	小区分	20020			20010		
	小区分名	ロボティクスおよび知能機械システム 関連			機械力学およびメカトロニクス関連		
開示希望の有無	審査結果の開示を希望する						
研究代表者 連絡先	〒 525-8577 (住所) 滋賀県草津市野路東1-1-1 立命館大学理工学部ロボティクス学科 電話番号 : 0775612879 Fax番号 : 0775612665 Email : hirai@se.ritsumeit.ac.jp						

研究組織（研究代表者及び研究分担者）

	氏名（年齢）	所属研究機関 部局 職	学位 役割分担	令和3年度 研究経費 （千円）	エフオ ート （%）
研究代表者	90212167 （58） ヒライ シンイチ 平井 慎一	立命館大学 理工学部 教授	工学博士 ウェットコンタクトの力学の 解析と応用に関する研究	4,898	20
	合計 1 名		研究経費合計	4,898	

研究概要

(1) 研究目的等

新学術（公募） - 2、3（研究目的）、6（今回の研究計画を実施するに当たっての準備状況及び研究成果を社会・国民に発信する方法）、7（これまでに受けた研究費とその成果等）、8（前回の公募研究の成果等）の内容を簡潔にまとめて記述すること。（1/2 頁程度。「研究計画・方法」と合わせて1頁以内）

本研究の目的は、ウェットコンタクトの力学を解明するとともに、その成果を踏まえて粘滑物のハンドリングを実現することである。ソフトロボットが活動する環境は、ドライな表面を有する物体のみならず、ウェットな表面を有する物体を含む。ソフトロボットとウェットな表面との接触では、粘着力が生じ、摩擦が減少し滑りやすくなるなど、ドライな接触とは異なる現象が生じる。そこで、柔らかく表面がウェットな物体の接触をウェットコンタクトと称し、その力学を解明することを目指す。さらに、その成果を基に、表面に粘着性や潤滑性を有する粘滑物のハンドリングを実現する手法を確立する。

ソフトロボットが活動する環境は、ウェットな表面を有する物体を含む。たとえば、ソフトハンドによる食品や海産物の把持においては、水や分泌物等で覆われた表面との接触が生じる。本研究では、柔らかく表面がウェットな物体の接触における力学を解明し、粘滑物ハンドリングを実現することを目指す。この研究により、ウェットな表面との接触の力学が明らかになれば、ウェットな表面との接触を伴うソフトロボットに対して、望ましい材料や表面特性を設計することが可能になり、「しなやかな体」を実現する上での一助になると考える。

申請者は前回の公募研究で、「ソフトコンタクトの力学と創成」に関する研究を進めた。ソフトロボットの身体と環境との接触をソフトコンタクトと称し、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、望ましい系の挙動を実現するためにソフトロボットの材料と形態の設計を試みている。ただし、前回の公募研究で対象とする接触は、ドライな表面との接触であり、ウェットコンタクトは対象としていない。そこで本申請では、ウェットコンタクトをターゲットとして研究を進める。

本研究の成果は、IEEE RoboSoft, IEEE ICRA, IEEE/RSJ IROS 等の国際会議で発表するとともに、Soft Robotics, IEEE Trans. Robotics, 日本ロボット学会誌等に雑誌論文として投稿する。また、国際ロボット展、国際食品工業展アカデミックプラザにおける展示・実演を進める。

(2) 研究計画・方法

新学術（公募） - 4、5（研究計画・方法）の内容を簡潔にまとめて記述すること。（1/2 頁程度。「研究目的等」と合わせて1頁以内）

令和3年度（2021年度）は、ソフトフィンガーとウェットな表面との接触を対象として、ウェットコンタクトの特性を実験的に調べ、その結果を基にウェットコンタクトの力学を定式化する。まず、ウェットコンタクトの特性を、購入予定の荷重 変位測定ユニットを用いて実験的に調べる。測定ユニットのアタッチメントの運動を制御することにより、接触力のみならず粘着力や摩擦力を計測する。硬さの調整が容易なシリコンゴムでソフトフィンガーを試作するとともに、表面のウェットな媒体として、水、ベクチンやカラギーナン等の増粘安定剤を用いる。また、ゲルを材料とする食品サンプルを対象として計測を試みる。これらの計測結果から、粘着力と摩擦力のモデルを構成する。特に、非線形性とヒステリシス、経時変化の表現について考察する。さらに、粘滑物の形状の複数のサンプルから、サンプルの共通形状を計算し、共通形状とサンプル形状の差を集めることにより、形状のバラツキを表現することを試みる。

令和4年度（2022年度）は、水産物を対象としてウェットコンタクトの力学を定式化するとともに、水産物に代表される粘滑物のハンドリングを実現することを目指す。まず、粘滑物を対象として、ウェットコンタクトのモデリングを進める。既存のソフトフィンガーを参考にして、荷重 - 変位測定ユニットのアタッチメントを試作し、計測結果よりソフトフィンガーと水産物とのウェットコンタクトを定式化する。また、水産物の形状を計測し、形状のバラツキをモデリングする。このモデリングを通して、様々な水産物におけるバラツキの特徴を抽出する。次に、複数のソフトハンドを用いて水産物に代表される粘滑物のハンドリングを試行し、そのパフォーマンスを評価する。評価した粘滑物ハンドリングのパフォーマンスとウェットコンタクトのモデルを比較し、ウェットコンタクトにおける種々の物理量が、ハンドリングのパフォーマンスに与える影響を解析する。さらに、形状のバラツキの特徴が、ハンドリングの与える影響を調べる。以上の解析を通して、粘滑物ハンドリングの原理を明らかにするとともに、パフォーマンスに優れた粘滑物ハンドリングの実現を目指す。

研究目的

本欄には、研究領域の全体構想及びその中で本研究の目的について、適宜、文献を引用しつつ記述し、特に次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述すること（記述に当たっては、「公募要領に示された領域の研究概要」（公募要領 17～26 頁を参照）を踏まえるとともに、「科学研究費助成事業「新学術領域研究」の審査要綱」を参考にすること。）

（2 頁以内）

研究の学術的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置付け、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）

研究期間内に、何をどこまで明らかにしようとするのか

当該領域の計画研究との連携により、当該領域の研究の一層の推進に貢献できる点

応募者の専門としている研究分野と当該領域の研究が有機的に結びつくことにより新たな研究の創造が期待できる点

当該分野における、この研究（計画）の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

令和 3（2021）年度において継続して科研費又は科研費以外の研究費（府省・地方公共団体・研究助成法人・民間企業等からの研究費）の助成を受ける予定がある場合は、当該継続研究課題と本研究課題との相違点

研究の学術的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置付け、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）

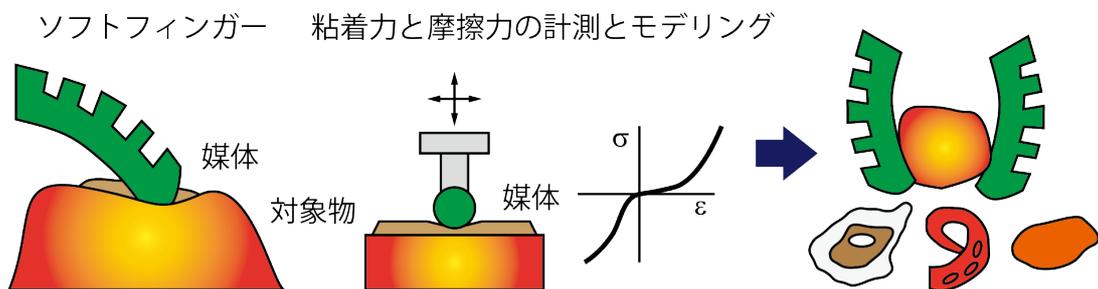
近年、ソフトロボティクスに関する研究、すなわち柔らかく変形しやすい材料で構成されたロボットに関する研究が盛んに行われている。ソフトロボットが実環境で動くときには、身体と環境との接触が生じる。ソフトロボットが活動する環境は、ドライな表面を有する物体のみならず、ウェットな表面を有する物体を含む。ソフトロボットとウェットな表面との接触では、粘着力が生じ、摩擦が減少し滑りやすくなるなど、ドライな接触とは異なる現象が生じる。応募者は、柔らかい材料から成るソフトハンドによる物体操作に関する研究を進めてきた。主に食品の把持と操作を対象として、様々なソフトハンドを提案し、対象物の形状や表面特性のバラツキにソフトハンドが対応できることを実験的に示してきた。このような研究の過程で、食品の表面の特性が把持や操作に大きく影響することが明らかになり、ウェットな表面との接触に関する研究が必要であるとの認識に至った。

研究期間内に、何をどこまで明らかにしようとするのか

本研究では、柔らかく表面がウェットな物体の接触をウェットコンタクトと称し、ウェットコンタクトの力学を解明するとともに（図 1 (a)）、その成果を踏まえて粘滑物のハンドリングを実現することを目指す（図 1 (b)）。ソフトロボットとウェットな表面との接触では、粘着力が生じ、摩擦が減少し滑りやすくなるなど、ドライな接触とは異なる現象が生じる。このような現象は従来、マイクロメカニクスや表面化学の分野で研究されており、メソスコピックレベルでの理解が進んでいる。一方、ソフトロボットとウェットな表面との接触は、ソフトロボットや対象物の変形、ウェットな表面における媒体の移動など、マクロな挙動に大きく影響される。したがって、メソスコピックレベルの研究成果を踏まえつつ、ウェットコンタクトの力学を理解することが、ソフトロボットの発展に必要な。そこで本研究では、様々な媒体や表面形状のウェットコンタクトにおいて、粘着力と摩擦力を計測・定式化するとともに、表面に粘着性や潤滑性を有する対象物（以下、粘滑物と称する）のハンドリングを実現する手法を確立することを目指す。

ウェットコンタクトの力学

粘滑物ハンドリング



(a) ウェットコンタクトの力学の解明

(b) 粘滑物ハンドリングの実現

図 1 本提案の概念

当該領域の計画研究との連携により、当該領域の研究の一層の推進に貢献できる点

A01 班「しなやかな体」では、ソフトマテリアルを用いた「変形・変化する身体」を研究の対象としている。「変形・変化する身体」が実環境で動くときには、身体と環境との接触が生じ、物理的な相互作用が生じる。ソフトロボットが活動する環境は、ドライな表面を有する物体のみならず、

ウェットな表面を有する物体を含む。たとえば、ソフトハンドによる食品や海産物の把持においては、水や分泌物等で覆われた表面との接触が生じる。ソフトロコモータが不整地を移動するときには、粘り気がある土や泥との接触がたびたび生じる。このような表面との接触では、粘着力が生じ、摩擦が減少し滑りやすくなるなど、ドライな接触とは異なる現象が生じる。そこで本研究では、柔らかく表面がウェットな物体の接触における力学を解明し、粘滑物ハンドリングを実現することを目指す。この研究により、ウェットな表面との接触の力学が明らかになれば、ウェットな表面との接触を伴うソフトロボットに対して、望ましい材料や表面特性を設計することが可能になり、「しなやかな体」を実現する上での一助になると考える。

応募者の専門としている研究分野と当該領域の研究が有機的に結びつくことにより新たな研究の創造が期待できる点

応募者は、ソフトハンドによるロボットマニピュレーションに関する研究を進めており、柔軟指と剛体対象物との接触と滑り運動のモデリング[1,2]、ソフトハンドによる食品ハンドリング[3,4]に関する成果を得た。接触や滑り運動のモデリングにおいては、ドライな表面を仮定していた。食品ハンドリングに関する研究は、ソフトハンドの試作とその実験的評価である。

ソフトロボットが活動する環境は、ドライな表面を有する物体のみならず、ウェットな表面を有する物体を含む。本研究では、ウェットコンタクトにおける力学を解明し、粘滑物ハンドリングを実現することを目指す。これにより、ウェットコンタクトを理解し制御すること、ウェットコンタクトに対応できるソフトロボットを設計することが可能になり、ソフトロボットの設計論につながる研究を想像できると考える。

- [1] T. Inoue and S. Hirai, *Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation*, ISBN 978-1-84800-980-6, Springer, 2009
- [2] V. Ho and S. Hirai, *Mechanics of Localized Slippage in Tactile Sensing*, ISBN 978-3-319-04122-3, Springer, 2014
- [3] Z. Wang, Y. Torigoe, and S. Hirai, *A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.2, Issue 4, pp.1909-1916, 10.1109/LRA.2017.2714141, 2017
- [4] Z. Wang, R. Kanegae, and S. Hirai, *Circular Shell Gripper for Handling Food Products*, *Soft Robotics*, <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0140>, 2020

当該分野における、この研究(計画)の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

ソフトロボットに関する研究は、ロボットそれ自体に関する研究が多く、ソフトロボットの身体と実環境との相互作用に関する研究は少ない。特に、ソフトロボットとウェットな表面との接触に関する研究は、ほとんど成されていない。ソフトロボットとウェットな表面との接触では、粘着力が生じ、摩擦が減少し滑りやすくなるなど、ドライな接触とは異なる現象が生じる。本研究の独創的な点は、ソフトロボットとウェットな表面との接触をウェットコンタクトと称し、ウェットコンタクトの力学を解明する点にある。ソフトロボットが実世界で活動するときには、ウェットな表面との接触を生じることが多い。したがって、ウェットコンタクトにおける力学を解明することは、ソフトロボット学の発展に貢献すると考える。

従来、食品加工業や水産加工業においては、ハンドリング作業の多くを人手に頼っていた。近年の労働力減少に伴い、このようなハンドリング作業の自動化が求められてきた。特に、COVID-19に起因するコロナ禍に伴い、狭い現場における人の密集を避けるために、自動化への要望が一挙に顕在化している。様々な研究が成される中、困難な課題として挙げられるのが、タコや生ガキなど柔らかく表面に粘着や滑性を有する対象物のハンドリングである。水産物の多くの表面は、水や分泌物等の媒体で覆われており、粘着性や潤滑性が生じている。本研究は、ウェットコンタクトの力学を解明し、その成果を基にして、粘着性や潤滑性を有する粘滑物のハンドリングを実現することを目指しており、ソフトロボット学の実世界への適用という観点においても、意義が高いと考える。

研究計画・方法

< 令和3(2021)年度の計画と令和4(2022)年度の計画に分けて記述すること。 >

本欄には、研究目的を達成するための研究計画・方法について、令和3(2021)年度の計画と令和4(2022)年度の計画に分けて、適宜、文献を引用しつつ焦点を絞り、具体的かつ明確に記述すること。ここでは、研究が当初計画どおりに進まないときの対応など、多方面からの検討状況について記述すること。(2頁以内)

また、研究協力者が参画する場合には、研究体制の全体像を明らかにするため、必要に応じて、研究代表者の役割のほか、研究協力者(海外共同研究者、科研費への応募資格を有しない企業の研究者、その他技術者や知財専門家等の研究支援を行う者、大学院生等(氏名、員数を記入することも可))の役割についても記述すること。なお、研究期間の途中で異動や退職等により研究環境が大きく変わる場合は、研究実施場所の確保や研究実施方法等についても記述すること。

令和3年度(2021年度)

令和3年度(2021年度)は、ソフトフィンガーとウェットな表面との接触を対象として、ウェットコンタクトの特性を実験的に調べ、その結果を基にウェットコンタクトの力学を定式化する。

まず、ウェットコンタクトの特性を実験的に調べる(図2)。購入予定の荷重変位測定ユニットを用いて、接触により生じる変位と力の関係を計測する。ウェットコンタクトの特性は、ソフトフィンガーの材料、対象物の材料、媒体の材質、環境の温度や湿度に影響されると考えられる。そこで、ソフトフィンガーの材料でアタッチメントを試作し、それを荷重変位測定ユニットに取り付け、ソフトフィンガーと対象物との接触を模擬する。アタッチメントとウェットな表面との接触により生じる変位と力の関係を計測することで、ソフトフィンガーと対象物とのウェットコンタクトを定式化することを試みる。このとき、アタッチメントを往復運動させることにより、接触力のみならず粘着力を計測する。対象物の材料や媒体の材質の候補を複数選び、それらの候補に対して計測を実施する。さらに、アタッチメントの向きを変更し、アタッチメントを対象物の接線方向に往復運動させることにより、摩擦力を評価する。

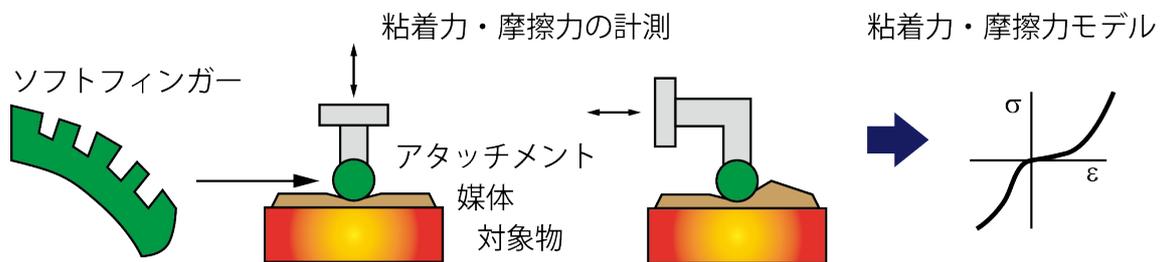


図2 粘着力・摩擦力の計測とモデリング

ソフトフィンガーや対象物の材料として、硬さの調整が容易なシリコーンゴムである Dragon Skin シリーズ, NinjaFlex シリーズを用いる。表面のウェットな媒体として、水、ペクチンやカラギーナン等の増粘安定剤を用いる。これらの材料を用いてウェットコンタクトを実現し、粘着力や摩擦力を計測し、ドライコンタクトにおける計測結果と比較する。特に、ソフトフィンガーと対象物との材料特性が異なる場合に対して、粘着力や摩擦力がどのように変化するかを調べる。さらに、ウェットな表面を持つ対象物の一つとして、ゲルを候補とする。現在、古川研究室(山形大学)と、ゲルを材料とする食品サンプル(図3)に関する研究を進めている。このゲル食品サンプルを対象として計測を試みる。これらの計測結果から、粘着力と摩擦力のモデルを構成する。特に、非線形性とヒステリシス、経時変化の表現について考察する。



図3 ゲル食品サンプル

粘滑物の多くは、形状のバラツキが大きい。ソフトロボットと粘滑物の接触を解析するときには、粘滑物における形状のバラツキを表現し、形状のバラツキが粘着力や摩擦力に与える影響を評価す

る必要がある。そこで、粘滑物の形状の複数のサンプルから、サンプルの共通形状を計算し、共通形状とサンプル形状の差を集めることにより、形状のバラツキを表現することを試みる（図4）。複数の共通形状とサンプル形状の差を標本とみなし、その確率的表現を求めることにより、形状のバラツキを表現することを試みる。

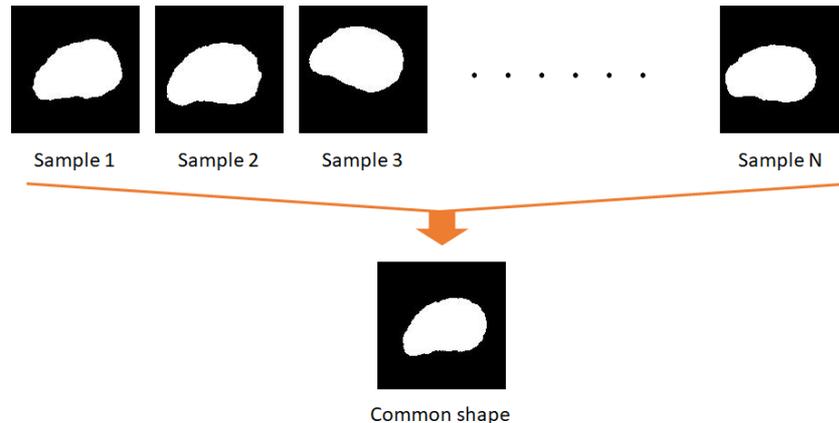


図4 形状のバラツキのモデリング

令和4年度（2022年度）

令和4年度（2022年度）は、水産物を対象としてウェットコンタクトの力学を定式化するとともに、水産物に代表される粘滑物のハンドリングを実現することを目指す。現在、食品加工業や水産加工業においては、タコや生ガキなど柔らかく表面に粘着や滑性を有する対象物のハンドリングが課題になっている。水産物の多くの表面は、水や分泌物等の媒体で覆われており、粘着性や潤滑性が生じている。このような対象物を粘滑物と称し、そのハンドリングを実現することを試みる。

まず、粘滑物を対象として、ウェットコンタクトのモデリングを進める。特に、水産物をターゲットとして、様々な水産物のウェットコンタクトを定式化する。現在、申請者の研究室では、接触部とその周囲が柔らかいエラストマーで構成されているソフトフィンガーハンド、柔らかい接触部の背後に硬い材料が用いられているシェルグリッパ、接触領域が凹面となる包み込みグリッパー、接触部が弾性糸であるバインディングハンドなど、様々なソフトハンドが試作されている（図5）。また、接触部の表面に、テクスチャーを施すことを試みている。このようなソフトフィンガーを参考にして、荷重-変位測定ユニットのアタッチメントを試作し、計測結果よりソフトフィンガーと水産物とのウェットコンタクトを定式化する。さらに、水産物の形状を計測し、形状のバラツキをモデリングする。このモデリングを通して、様々な水産物におけるバラツキの特徴を抽出することを試みる。

次に、複数のソフトハンドを用いて水産物に代表される粘滑物のハンドリングを試行し、そのパフォーマンスを評価する。購入予定のミキサーを用いて、形状や変形特性が異なる様々なソフトハンドを試作し、粘滑物ハンドリングに供する。評価した粘滑物ハンドリングのパフォーマンスとウェットコンタクトのモデルを比較し、ウェットコンタクトにおけるどのような物理量がハンドリングのパフォーマンスに影響するかを解析する。さらに、形状のバラツキの特徴が、ハンドリングの与える影響を調べる。以上の解析を通して、粘滑物ハンドリングの原理を明らかにするとともに、パフォーマンスに優れた粘滑物ハンドリングの実現を目指す。

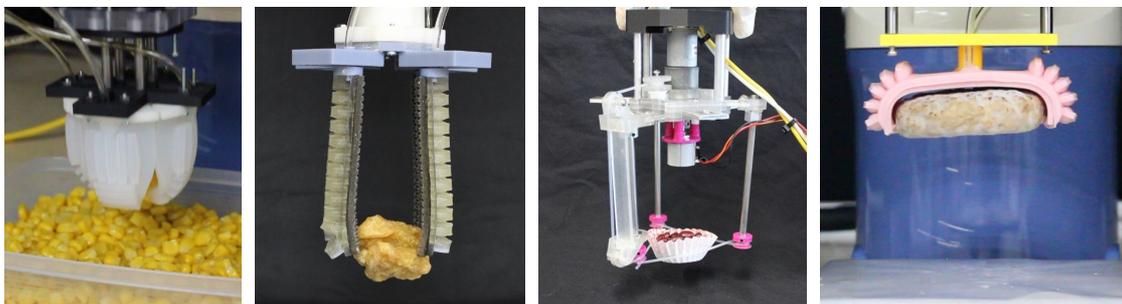


図5 食品ハンドリング用ソフトハンド

今回の研究計画を実施するに当たっての準備状況及び研究成果を社会・国民に発信する方法

本欄には、次の点について、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述すること。（1頁以内）
 研究協力者が参画する場合には、その者との連絡調整の状況など、研究着手に向けての状況
 （必要に応じて記述すること。）
 本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等

研究協力者が参画する場合には、その者との連絡調整の状況など、研究着手に向けての状況
 （必要に応じて記述すること。）

該当なし

本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等

研究成果を、国際会議 IEEE Int. Conf. Soft Robotics (RoboSoft), IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA), IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems で発表する。特に、IEEE Int. Conf. Soft Robotics (RoboSoft) は、ソフトロボティクスに関する国際会議であり、当領域と関係が深いので、積極的に投稿する。並行して国内会議、たとえば、日本ロボット学会学術講演会、日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会等で発表する。

まとまった成果を、Soft Robotics, IEEE Trans. Robotics, 日本ロボット学会誌等に雑誌論文として投稿する。

本研究の成果に関しては、論文発表、国際会議発表、必要に応じて特許申請を行うとともに、国際ロボット展、国際食品工業展アカデミックプラザにおける展示・実演を進める。応募者は、これまで国際ロボット展、国際食品工業展アカデミックプラザで、ソフトハンドの展示・実演を行ってきた。国際ロボット展は、2年に一回開催されるロボット技術に関する国内最大の展示会であり、2019年度は14万人強が来場した。本研究の成果を社会に発信する絶好の機会であり、2021年度、2023年度の展示・実演を目指す。国際食品工業展は、日本食品機械工業会が毎年開催する、食品機械に関する展示会であり、2019年度は10万人強が来場している。国際食品工業展では、大学等の成果を発表するアカデミックプラザを併設しており、粘滑物ハンドリングに関する成果を発信する。

研究成果を、応募者のウェブページに、日本語と英語で掲載する。

<http://www.ritsumeai.ac.jp/~hirai/>

<http://hirailab.com/>

これまでに受けた研究費とその成果等

本欄には、研究代表者がこれまでに受けた研究費（科研費、所属研究機関より措置された研究費、府省・地方公共団体・研究助成法人・民間企業等からの研究費等。なお、現在受けている研究費も含む。）による研究成果等のうち、本研究の立案に生かされているものを選定し、科研費とそれ以外の研究費に分けて、次の点に留意し記述すること。（1頁以内）

それぞれの研究費ごとに、研究種目名（科研費以外の研究費については資金制度名）、期間（年度）、研究課題名、研究代表者又は研究分担者の別、研究経費（直接経費）を記入の上、研究成果のほか、中間・事後評価及び研究進捗評価（当該研究費の配分機関が行うものに限る。）の結果を簡潔に記述すること。

科研費とそれ以外の研究費は線を引いて区別して記述すること。

科学研究費補助金 基盤研究 A (No.15H02230), 2015 年度 - 2017 年度, 触知覚センシングにおける軟組織のダイナミクス・トライボロジー, 研究代表者, 34,000 千円

本研究では、人の触覚センシングを力学的に理解することを試みた。人の指の有限要素モデルを構築し、指が物体表面上を滑る過程のシミュレーションを実行した。人の触覚受容器に相当する部分に発生する加速度やひずみエネルギーを評価し、押し運動や滑り運動を検出することができるかどうかを考察した。三次元プリンタで有限要素モデルと同様の指を試作し、試作した指を用いた滑り実験を行い、シミュレーションの妥当性を評価した。本研究では、ドライコンタクトを対象としてモデリングを進めており、ウェットコンタクトは対象としていない。

私立大学研究ブランディング事業, 2016 年度 - 2020 年度, 立命館ライフサポート科学で切り拓く高齢化日本の持続的発展モデルの構築, 研究分担者, 15,000 千円

本研究では、高齢者の健康寿命の延伸に貢献する「人にやさしい」ロボットの設計・試作のために、柔らかい材料を用いたセンサ、アクチュエータ、ロボットシステムの開発を進めた。柔らかい材料から成るロボット要素を試作するために、三次元プリンタ Objet350 Connex 3 (Stratasys 社製) を導入した。応募者は、この三次元プリンタを用いてソフトハンドやソフトセンサを試作し、ソフトハンドによる物体把持やソフト触覚センシングに関する研究を進めた。また、口腔ケア訓練・評価システムなど、看護に関する研究を進めた。口腔ケア訓練・評価システムに関する研究では、口腔内の粘着性をどのように模擬するかが、一つの課題として挙げられており、ウェットコンタクトのモデリングの必要性を認識した。

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期 フィジカル空間デジタルデータ処理基盤, 2018 年度 - 2022 年度, CPS 構築のためのセンサリッチ柔軟エンドエフェクタシステムの開発と実用化, 研究分担者, 5,602 千円

本研究開発では、食品ハンドリングのためのソフトハンドに関する研究開発を進めている。刻みネギやコーンなどの細断食品、フライやハンバーグなどの冷凍食品、キュウリや大根などの長尺食品等、形状や寸法、表面特性が異なる様々な食品に対して、ソフトハンドを試作している。本研究開発を進める中で、表面が滑りやすい冷凍食品、表面に粘着性を有する水産物のハンドリングが課題として浮上し、ウェットコンタクトのモデリングの必要性を認識した。ただし、本研究開発では、ハンドリングの実現が目標であり、モデリングに関する研究は進めていない。したがって、モデリングに関する研究、モデリングとハンドリングをつなぐ研究が必要である。

前回の公募研究の成果等

本欄には、平成30(2018)年度開始の研究領域における公募研究に採択された研究者が、同一領域の公募研究に応募する場合、前回の研究成果や領域の推進への貢献状況について記述すること。なお、前記に該当しない場合は「該当なし」と記載すること。(1頁以内)

注)公募研究の研究期間は2年間(領域設定期間の2~3年目及び4~5年目)で、領域設定期間の1年目と3年目に当たる時期に公募が行われます。

前回の公募研究では、「ソフトコンタクトの力学と創成」に関する研究を進めた。本研究では、ソフトロボットの身体と環境との接触をソフトコンタクトと称し、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、望ましい系の挙動を実現するためにソフトロボットの材料と形態の設計を試みている。ソフト触覚センシングに関して、静電容量式センサの力学モデルを構築し、接触領域や応力分布がセンサの出力に与える影響を、理論的ならびに数値的に解析した。解析を通して、静電容量式センサの誘電体の応力-ひずみ関係を適切に設計することにより、接触面積に依存せず、接触力のみで依存するセンサを実現できる可能性を見出した[C1, D1]。得られた応力-ひずみ関係を実現する手法を、現在考察している。また、新竹研究室(電気通信大学)で開発しているソフト歪みセンサを、平井研究室で研究しているソフトハンドに実装し、把持状態の推定を試みている[D4]。跳躍ソフトロボットに関して、高い跳躍を実現する変形形状を設計することを試みた。これまで、4個の形状からの跳躍を比較し、その中ではdish shapeと呼ばれる変形形状が高い跳躍を実現することがわかっていった。今回の研究では、dish shapeに近い形状を得るとともに、高い跳躍を実現する別の変形形状を得た[C2, C3, D2, D8]。また、得られた変形形状を実現するメカニズムを試作した[C4, D6]。さらに、新山研究室(東京大学)との共同研究で、跳躍のモデリングをコメツキムシの跳躍に適用し、解析を進めた[D7]。また、跳躍ソフトロボットの構成要素である線状物体の動的なモデルを構築した[D3, D5]。

以上のように本研究は、「変形・変化する身体」が実環境で動くときに生じる、身体と環境との接触に関する研究であり、領域内の共同研究を含めて、領域の研究推進に貢献している。

国際会議

- C1. Shinichi Hirai and Takahiro Matsuno, Morphological Design of Soft Capacitive Force Sensor, 30th International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS 2019), pp.141-143, Toyoda Auditorium, Nagoya University, Nagoya, Japan, Dec. 1-4, 2019
- C2. Takahiro Matsuno and Shinichi Hirai, Deformed Shape Optimization of a Circular Elastic Jumping Robot Using Genetic Algorithm, 2020 IEEE Int. Conf. on Soft Robotics (RoboSoft 2020), online, May 15 - June 15, 2020
- C3. Takahiro Matsuno and Shinichi Hirai, Optimization of the Initial Deformed Shape of a Circular Elastic Jumping Robot, 2020 IEEE Int. Conf. on Soft Robotics (RoboSoft 2020), online, May 15 - June 15, 2020
- C4. Takahiro Matsuno, Tatsuro Katsuma, Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Novel Quick Return Mechanism and Dish Shape Deformable Body Structure for Circular Jumping Robot, 2020 IEEE Int. Confe. on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2020), online, Sept. 28-29, 2020

国内会議

- D1. 平井 慎一, 松野 孝博, ソフト力覚センサの形態学的設計, 第37回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2019), 東京都新宿区・早稲田大学早稲田キャンパス, Sept. 3-7, 2019
- D2. 松野 孝博, 平井 慎一, 遺伝的アルゴリズムを用いた弾性外殻を有する円形ロボットの跳躍姿勢の最適化, 第37回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2019), 東京都新宿区・早稲田大学早稲田キャンパス, Sept. 3-7, 2019
- D3. 平井 慎一, 混合座標法に基づく線状ソフトロボットの動的モデリング, ロボティクス・メカトロニクス講演会2020, オンライン, May 27-30, 2020
- D4. 松野 孝博, 鐘江 峻, 清水 敬太, 王 忠奎, 新竹 純, 平井 慎一, 静電容量型ソフト歪みセンサを用いた薄型平面シェルグリッパの把持状態推定, 第38回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2020), オンライン, Oct. 9-11, 2020
- D5. 平井 慎一, 四元数を用いた線状ソフトロボットの三次元変形表現, 第38回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2020), オンライン, Oct. 9-11, 2020
- D6. 勝間 達郎, 松野 孝博, 平井 慎一, 円形ソフトロボットにおける高度跳躍のための変形機構と弾性外殻構造, 第38回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2020), オンライン, Oct. 9-11, 2020
- D7. 松野 孝博, 新山 龍馬, 平井 慎一, 拮抗駆動式2リンク跳躍ロボットの跳躍シミュレーション, 第38回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2020), オンライン, Oct. 9-11, 2020
- D8. 勝間 達郎, 松野 孝博, 平井 慎一, 円形ソフトロボットにおける弾性外殻の変形形状解析, 2020年度日本ばね学会 秋季講演会, オンライン, Oct. 27 - Nov. 5, 2020

人権の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領 4 頁参照）

本欄には、本研究を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を、1 頁以内で記述すること。

個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となります。

該当しない場合には、その旨記述すること。

本研究は、ウェットコンタクトの力学と粘滑物ハンドリングに関する研究であり、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究等には該当しない。

応募者の研究遂行能力及び研究環境

本欄には応募者（研究代表者）の研究計画の実行可能性を示すため、(1)これまでの研究活動、(2)研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）について2頁以内で記述すること。

「(1)これまでの研究活動」の記述には、研究活動を中断していた期間がある場合にはその説明などを含めてもよい。

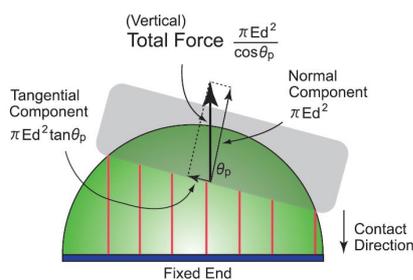
(1) これまでの研究活動

応募者の平井は、ロボットマニピュレーション、柔軟物モデリング、ソフトロボティクスに関する研究を進めている。

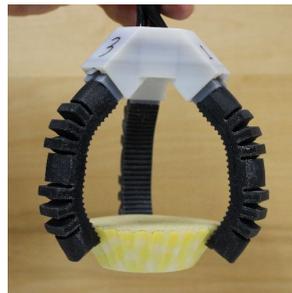
把持や組立、ハンドリングに代表されるマニピュレーションは、ハンドと対象物、対象物と環境との接触を通して成される。したがって、ロボットによるマニピュレーション、すなわちロボットマニピュレーションを実現する上で、接触の理解と制御は重要である。このような観点から、応募者は1985年頃よりロボットマニピュレーションに関する研究を進め、凸多面錐理論を用いて剛体接触を定式化した[1]。2000年頃より、柔軟指による物体操作に関する研究を進め、柔軟指先の平行分布モデルを提案した[2,3]。平行分布モデルを用いて柔軟指のポテンシャルエネルギーを定式化するとともに、柔軟指による把持が安定であることをエネルギーの観点から解明した。続いて、柔軟指による滑り操作を解析するために、ビーム束モデルを提唱し、局所滑り現象を解明した[4,5]。局所滑りとは、指先が対象物の表面を滑る始めるとき、接触面の一部が滑る現象であり、人の物体操作において重要な役割を果たすことが知られている。応募者は、提唱したビーム束モデルを用いて局所滑りを解析し、局所滑りがどのように生じるかを明らかにした。さらに、弾性糸を用いたバイディングハンドに関する研究[6]、ソフトグリッパによる柔軟物操作に関する研究[7,8,9]を進めている。

ロボットマニピュレーションの対象として、布地や食材など柔らかい物体が挙げられる。そのような柔軟物のモデリングに関する研究を1990年頃より進め、微分幾何座標を用いた線状物体の力学モデリングを提唱した[10]。2000年頃より、食品材料に代表されるレオロジー物体のモデリングに関する研究を始め、レオロジー物体の力学パラメータの同定法を提案した[11,12]。

ソフトロボティクスに関する研究は、2002年頃より進めている。跳躍移動ソフトロボットに関する研究[13,14]、変形空気圧アクチュエータに関する研究[15]、布地センサによる近接センシングに関する研究[16]、柔軟指先力覚センサ[17]など、ソフトロボティクスに関する研究を幅広く推進している。



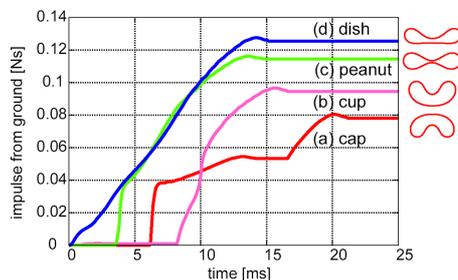
柔軟指先の平行分布モデル[2,3]



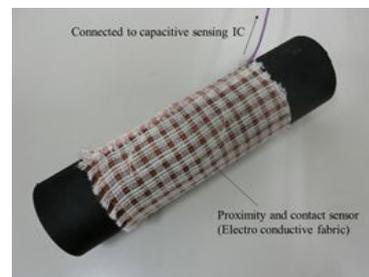
ソフトグリッパ[7]



線状物体モデリング[10]



跳躍ソフトロボットの力学解析[14]



滑りセンシング[16]

2) 研究環境

応募者の研究室に、共同利用の設備として、三次元プリンタ Objet350 Connex 3 (Stratasys社製) が設置されている。この三次元プリンタは、ゴム材料を用いることが可能で、場所によって弾性が異なる部材を印刷することができる。また、研究室に三次元プリンタ Prusa i3 が複数台設置されている。このプリンタは、硬い材料を用いて精度の高い形状を印刷することが可能であり、ソフトハンドを成形する型を印刷することができる。応募者は、以上の三次元プリンタを用いてソフトハンドやソフト触覚センサの試作を行った経験がある。また、研究室に、多関節ロボットマニピュレータ VP-6242 (デンソーウェーブ社製) が、共同実験室にはスカラ型ロボットマニピュレータ HSR065A1 (デンソーウェーブ社製) が設置されている。これらのロボットマニピュレータは、ROS (Robot Operating System) を用いて制御することができ、ROS 対応の他のデバイスやセンサと容易に統合することができる。応募者は、このロボットマニピュレータと空気圧駆動ソフトグリッパを ROS により用いて制御した経験がある。また、研究室では、有限要素解析ソフトウェア Simulia Abaqus (Dassault Systèmes 社製) を用いており、ソフトロボットに関する有限要素解析を実施することが可能である。

応募者は、本提案につながるロボットマニピュレーションと柔軟物モデリング、ソフトロボティクスに関する研究を進めてきており、本提案を実行する能力を有していると判断する。

研究業績

- [1] S. Hirai and H. Asada, Kinematics and Statics of Manipulation Using the Theory of Polyhedral Convex Cones, *Int. J. Robotics Research*, 12(5), 434-447, 1993
- [2] T. Inoue and S. Hirai, Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-Fingered Manipulation, *IEEE Trans. Robotics*, 22(6), pp.1273-1279, 2006
- [3] T. Inoue and S. Hirai, *Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation*, ISBN 978-1-84800-980-6, Springer, 2009
- [4] V. Ho and S. Hirai, *Mechanics of Localized Slippage in Tactile Sensing*, ISBN 978-3-319-04122-3, Springer, 2014
- [5] V. Ho and S. Hirai, A Novel Model for Assessing Sliding Mechanics and Tactile Sensation of Human-Like Fingertips during Slip Action, *Robotics and Autonomous Systems*, 63(3), pp.253-267, 2015
- [6] H. Iwamasa and S. Hirai, Binding of Food Materials with a Tension-Sensitive Elastic Thread, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2015
- [7] Z. Wang, Y. Torigoe, and S. Hirai, A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(4), pp.1909-1916, 2017
- [8] Y. Kuriyama, Y. Okino, Z. Wang, and S. Hirai, A Wrapping Gripper for Packaging Chopped and Granular Food Materials, *2019 IEEE Int. Conf. on Soft Robotics*, 2019
- [9] Z. Wang, R. Kanegae, and S. Hirai, Circular Shell Gripper for Handling Food Products, *Soft Robotics*, <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0140>, 2020
- [10] H. Wakamatsu and S. Hirai, Static Modeling of Linear Object Deformation Based on Differential Geometry, *Int. J. Robotics Research*, 23(3), pp.293-311, 2004
- [11] Z. Wang and S. Hirai, Modeling and Estimation of Rheological Properties of Food Products for Manufacturing Simulations, *J. Food Engineering*, 102(2), pp.136-144, 2011
- [12] Z. Wang and S. Hirai, Finite Element Modeling and Physical Property Estimation of Rheological Food Objects, *J. Food Research*, 1(1), pp.48-67, 2012
- [13] Y. Sugiyama and S. Hirai, Crawling and Jumping by a Deformable Robot, *Int. J. Robotics Research*, 25(5-6), pp.603-620, 2006
- [14] Y. Matsuyama and S. Hirai, Analysis of Circular Robot Jumping by Body Deformation, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1968-1973, 2007
- [15] S. Hirai, T. Masui, and S. Kawamura, Prototyping Pneumatic Group Actuators Composed of Multiple Single-motion Elastic Tubes, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001
- [16] T. Matsuno, Z. Wang, K. Althoefer, and S. Hirai, Adaptive Update of Reference Capacitances in Conductive Fabric Based Robotic Skin, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), pp.2212-2219, 2019
- [17] M. H. Rosle, R. Kojima, K. Or, Z. Wang, and S. Hirai, Soft Tactile Fingertip to Estimate Orientation and the Contact State of Thin Rectangular Objects, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(1), pp.159-166, 2020

研究費の応募・受入等の状況

新学術（公募）13 - (1)

(1) 応募中の研究費

研究者氏名	平井 慎一				
資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割	令和3年度の研究経費（期間全体の額）	令和3年度エフオ-ト（%）	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由（科研費の研究代表者の場合は、研究期間全体の受入額）
【本応募研究課題】新学術領域研究（研究領域提案型）（継続の研究領域） (R3～R4)	ウェットコンタクトの力学と粘滑物ハンドリングへの応用	代表	4,898 (9,363) (千円)	20	/
			(千円)		(総額 9,363 千円)
			(千円)		
			(千円)		
			(千円)		

