

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、ソフトコンタクトにおける力学の解明と、ソフトコンタクトを生み出すための材料と形態の設計である。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、ソフトコンタクトの力学を解明するとともに、望ましいソフトコンタクトを生み出すための材料と形態を明らかにする。ソフトハンドによる物体操作とソフト触覚センシングを対象として、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、ソフトコンタクトにおける望ましい系の挙動を実現するために、ソフトフィンガーやソフトセンサの材料と形態の設計を試みる。

応募者は、ロボットマニピュレーションにおける接触の力学モデリングを進めてきた。近年、柔軟指による物体操作に関する研究を進め、柔軟指と対象物との接触をモデリングし、指先の形状が物体操作に与える影響をポテンシャルエネルギーの概念を通して明らかにした。また、研究室内に共同利用の設備として、三次元プリンタ Objet350 Connex 3 (Stratasys 社製) を設置した。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。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操作やソフト触覚センシングに関する研究を進めた。これらの研究を通して、ソフトロボットの身体と環境との接触、すなわちソフトコンタクトの重要性を認識し、その研究を進めることが必要との認識に至った。

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)

平成 31 年度は、ソフトハンドによる物体操作を対象として、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、ソフトコンタクトにおける望ましい系の挙動を実現するために、ソフトハンドを構成する材料の変形特性を設計することを試みる。柔軟材料の変形特性と接触力や対象物の運動との関係を定式化するとともに、望ましい接触力や対象物の運動を得るような柔軟材料の変形特性を導くことを試みる。さらに、対象物の幾何学的形状や物理特性の不確定性を確率的に表現し、不確定性環境下におけるソフトコンタクトの力学を定式化する。すなわち、確率分布で表された幾何学的形状や物理特性を有する対象物に、ソフトハンドが接触したときの接触力や対象物の運動を確率的に表すことを試みる。さらに、不確定性があるときに、望ましい接触力や対象物の運動を得るように、ソフトフィンガーの柔軟材料の変形特性を設計することを試みる。

また、望ましい接触力や対象物の運動から柔軟材料の変形特性を導き、その変形特性を実現する材料や構造を創生することを試みる。三次元プリンタで作製することを念頭に、二種類あるいは三種類の材料を層状に分布させる、サイズの等しい空孔を複数の密度で分布させることで、構造を設計する。

平成 32 年度は、ソフトハンドとソフト触覚センサの形態設計に関する研究を進める。ソフトハンドを構成するソフトフィンガーに着目し、フィンガーの材料や構造とフィンガーの挙動との関係を解析するとともに、与えられた挙動を実現するソフトフィンガーの形態を設計することを目指す。また、キャパシタンスペース接触センサを対象として、接触分布に依存せず力のみをセンシングする、特定の応力分布に反応する等のセンシング機能を実現するように、センサ要素である誘電体の材料や構造を設計することを目指す。

研究目的

本欄には、研究領域の全体構想及びその中での本研究の具体的な目的について、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53～73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

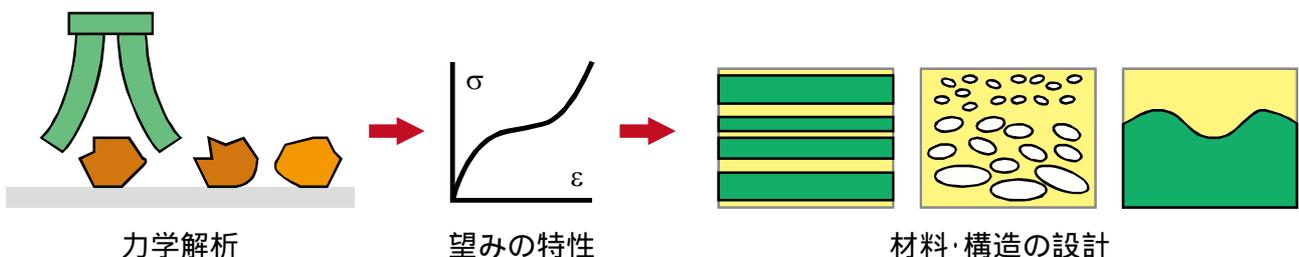
平成31年度において継続して科研費又は科研費以外の研究費（府省・地方公共団体・研究助成法人・民間企業等からの研究費）の助成を受ける予定がある場合は、当該継続研究課題と本研究課題との相違点

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。しかしながら、ソフトロボットの身体と環境との接触に関しては、系統的な研究が成されていない。応募者は、ロボットマニピュレーションに関する研究において、剛体指と対象物との接触、柔軟指と対象物との接触のモデリングに関する研究を進めてきた。柔軟指による物体操作に関する研究では、柔軟指と対象物との接触をモデリングし、指先の形状が物体操作に与える影響をポテンシャルエネルギーの概念を通して明らかにした。さらに、柔軟指のポテンシャルエネルギーを用いることで、物体操作における制御則が単純になり、環境の不確定性や制御系内の時間遅れに対応できることを示した。これらの研究の成果、特に柔軟指と対象物の接触のモデリングに関する研究の成果を踏まえ、ソフトロボットの身体と環境との接触に関して理論的な研究を進めることができるとの着想に至った。

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、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、ソフトコンタクトの力学を解明するとともに、望ましいソフトコンタクトを生み出すための材料と形態を明らかにする。特に、ソフトハンドによる物体操作とソフト触覚センシングを対象として、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、ソフトコンタクトにおける望ましい系の挙動を実現するために、ソフトフィンガーやソフトセンサを構成する材料の変形特性を設計することを試みる。さらに、望みの変形特性を実現する材料や構造を創生する手法を確立する。すなわち、本研究では、力学の定式化を通して望ましい特性を導き、望ましい特性を実現する材料や構造の設計を進める。



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。たとえば、ソフトハンドによる物体操作では、柔らかい指先と対象物との接触が、ソフトロコモータによる移動では、柔らかい足部と地面との接触が生じる。接触に伴う物理的な相互作用は、ソフトロボットの挙動に大きく影響する。そこで、本提案では、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、ソフトコンタクトの力学を解明するとともに、望ましいソフトコンタクトを生み出すための材料と形態を明らかにする。この研究により、実環境で望ましい挙動を生み出すための、ソフトロボットのボディの形態や材料特性が明らかになると期待され、「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

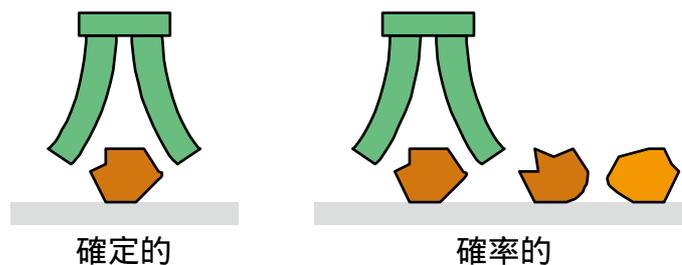
応募者は、ロボットマニピュレーションに関する研究を進め、剛体どうしの接触のモデリング[1]、柔軟指と剛体対象物との接触と滑り運動のモデリング[2,3]に関する成果を得た。これらの研究においては、接触の力学モデリングを進め、その成果を運動のプランニング、制御、ハプティックインターフェースに展開した。一方、ソフトロボットにおいては、「変形・変化する身体」の材料や構造に様々な選択肢がある。本提案では、ソフトコンタクトにより生じるソフトロボットと環境との相互作用を定式化するとともに、望ましい特性を実現するために、身体材料や構造を設計することを目指す。これにより、ソフトロボットの設計論につながる研究を創造できると考える。

- [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, Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation, ISBN 978-1-84800-980-6, Springer, 2009
 [3] V. Ho and S. Hirai, Mechanics of Localized Slippage in Tactile Sensing, ISBN 978-3-319-04122-3, Springer, 2014

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、ほとんど成されていない。本計画では、ソフトロボットの身体と実環境との力学的な相互作用を研究の対象とする点に、学術的な特色がある。ソフトコンタクトに関する研究を通して、ソフトロボットの身体材料や構造、形態に関する知見を得るとともに、それらを設計することが可能になり、ソフトロボットに望ましい挙動を実現することが可能になると予想される。

本研究の独創的な点の一つは、操作対象物を確定的に扱う代わりに、確率的に扱う点にある。物体操作においては、対象物の形状や特性の不確定性 (uncertainty) に対応する必要がある。ソフトハンドを用いると、ハンドが不確定性を吸収し、対象物を把持し操作することができる。しかしながら、不確定性とソフトハンドの材料特性や形態との関係は明らかではない。そこで本研究では、対象物の不確定性を確率的に表し、ソフトコンタクトの力学を定式化することを試みる。



本研究の意義は、ソフトコンタクトの解析を進めるとともに、望ましいソフトコンタクトを実現するために、ソフトロボットの身体を構成する材料や身体形態を設計する点にある。この研究を通して、ソフトマテリアルをロボットの身体に積極的に用いる意義を明らかにし、ソフトロボットの身体を設計するための基盤とする。

研究計画・方法

<平成31年度の計画と32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具体的な研究計画・方法について、平成31年度の計画と平成32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。

平成31年度

平成31年度は、ソフトハンドによる物体操作を対象として、ソフトコンタクトにおける力学を定式化するとともに、ソフトコンタクトにおける望ましい系の挙動を実現するために、ソフトハンドを構成する材料の変形特性を設計することを試みる。

物体操作においてソフトハンドを用いる理由の一つは、指と対象物との衝突において生じる接触力の緩和である。接触力の動的な変化や対象物の動的な挙動は、ソフトフィンガーを構成する柔軟材料の特性に大きく依存する。そこで、柔軟材料の変形特性と接触力や対象物の運動との関係を定式化するとともに、望ましい接触力や対象物の運動を得るような柔軟材料の変形特性を導くことを試みる。これまでに、変形量や応力を目標関数として、ソフトフィンガーの形状や寸法を設計する手法を示した。これは、有限要素シミュレーションと最適化を用いる手法であり（図1(a)）、変形量が最大となる指（図1(b)）、発生力が最大となる指（図1(c)）を得ている。材料特性を有限個のパラメータで表す、すなわち材料特性をパラメタライズすることにより、最適化の手法を適用することができるようになると思う。そこで、この手法を参考にして、ソフトフィンガーの材料特性を設計することを試みる。

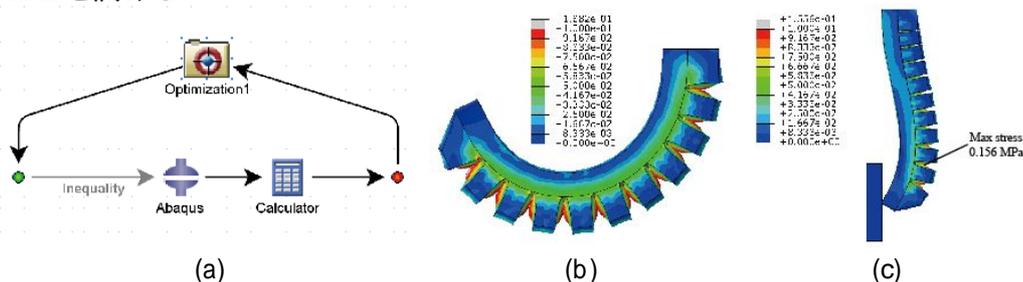


図1 シミュレーションと最適化を用いた形状設計

物体操作においては、対象物の形状や特性の不確定性(uncertainty)に対応する必要がある。ソフトハンドを用いるもう一つの理由は、このような不確定性への対応である。すなわち、ソフトハンドを用いると、ハンドが不確定性を吸収し、対象物を把持し操作することができる。一方、従来のロボットマニピュレーションの研究においては、このような不確定性は考慮されておらず、対象物の形状や特性の不確定性と、ソフトハンドの材料特性や形態との関係は明らかではない。そこで、対象物の幾何学的形状や物理特性の不確定性を確率的に表現し、不確定性環境下におけるソフトコンタクトの力学を定式化する。すなわち、確率分布で表された幾何学的形状や物理特性を有する対象物に、ソフトハンドが接触したときの接触力や対象物の運動を確率的に表すことを試みる。さらに、不確定性があるときに、望ましい接触力や対象物の運動を得るように、ソフトフィンガーの柔軟材料の変形特性を設計することを試みる。接触力や対象物の運動が確率的に表されるため、望ましい接触力や対象物の運動も確率的に表す。材料特性をパラメタライズすることにより、最適化の手法を適用できると考えるが、いくつかの量を確率的に表しているため、理論展開や計算が困難になる可能性がある。もし、理論展開や計算が困難な場合は、有限個のサンプルで確率的な量を表し、計算を進める。たとえば、対象物の形状を確率的に表すことが困難である場合は、有限個の異なる形状をサンプルとして与え、理論展開や計算を進める。

物体操作において、望ましい接触力や対象物の運動を与えたときに、それを実現する材料や構造を創生する手法を検討する。たとえば、変形量と接触力との関係が与えられるとき、それを実現する手段は、非線形弾性材料（図2(b)）、多層構造（図2(c)）、ポーラス構造（図2(d)）等、様々な材料や構造が考えられる。そこで、望ましい接触力や対象物の運動から柔軟材料の変形特性を導き、その変形特性を実現する材料や構造を創生することを試みる。三次元プリンタで作製することを念頭に、二種類あるいは三種類の材料を層状に分布させる、あるいはサイズの等しい空孔を複数の密度で分布させることで、構造を設計する。試作した材料や構造の変形特性を計測し、設計手法の妥当性を実験的に検証する。力と変位の関係は、接触領域の形状によって異なると思われる。そこ

で、複数のプローブを用意し、接触領域が力と変位の関係にどのように影響するかを実験的に明らかにする。また、有限要素シミュレーションを通して、構造の変形特性を数値的に計算し、シミュレーション結果と実験結果を比較する。

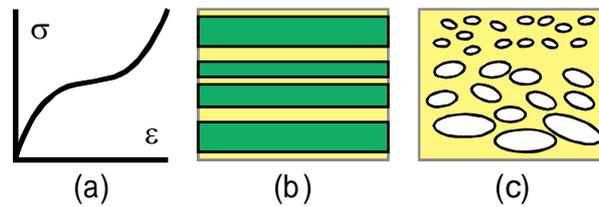


図2 材料や構造の創生

平成 32 年度

平成 32 年度は、ソフトハンドとソフト触覚センサの形態設計に関する研究を進める。

ソフトハンドを構成するソフトフィンガーに着目し、フィンガーの材料や構造とフィンガーの挙動との関係を解析するとともに、与えられた挙動を実現するフィンガーの形態を設計することを目指す。ソフトロボットハンドは、複数のソフトフィンガーから成る。ソフトフィンガーの材料や構造は、ソフトフィンガーの挙動に大きく影響する。たとえば、材料特性と空気圧室の分布が一様な指（図 3(a)）、空気圧室の分布が非一様な指（図 3(b)）、特性が非一様な指（図 3(c)）では、指の変形形状が異なる。また、指により、把持力やインピーダンス特性が異なる。三次元プリンティング技術の発展に伴い、形態や材料特性が非一様なパーツを作製することが容易になっている。そこで、本項目では、指の変形形状や把持力等を与え、それを実現する指の材料や構造を設計するとともに、設計した指を三次元プリンタで試作し、その特性を実験的に検証することを目指す。

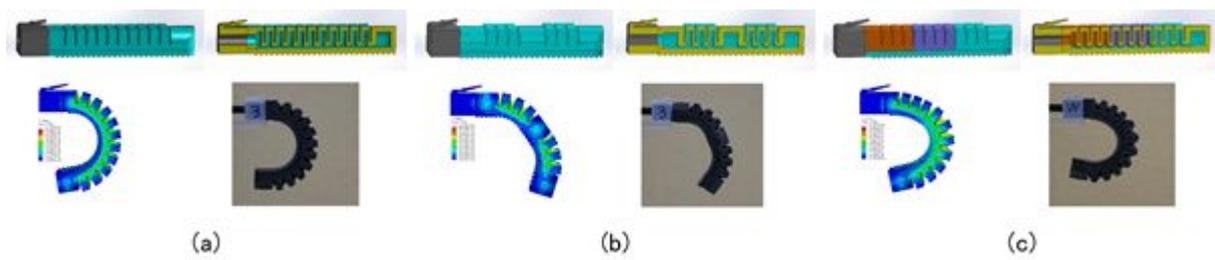


図3 材料と構造が異なるソフトフィンガーの挙動

望みの触覚センシングを実現するために、ソフトセンサの形態を設計することを目指す。柔らかい導電性材料から成る二枚の電極で、誘電体となる柔らかい非導電性材料を挟むことで、キャパシタンスベースの触覚センサを実現することができる（図 4）。このとき、キャパシタンスの値は、電極に印加される力のみならず、物体との接触面における応力分布に依存する。したがって、誘電体の材料や構造を選ぶことにより、力や接触面とキャパシタンスとの関係を決定することができる。たとえば、非線形弾性材料、多層構造、ポーラス構造等を用いることより、様々な触覚センシングを実現できると考えられる。そこで、接触分布に依存せず力のみをセンシングする、特定の応力分布に反応する等のセンシング機能を実現するように、誘電体の材料や構造を設計することを目指す。

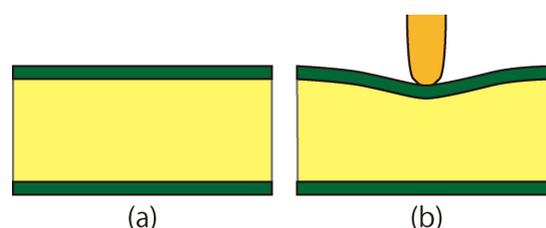


図4 キャパシタンスベース触覚センサ

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。

応募者は、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。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。

研究成果を、応募者のウェブページに掲載する。

<http://www.ritsumei.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。

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ている。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ている。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ている。

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。

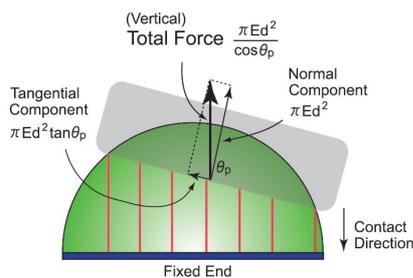
(1) これまでの研究活動

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。

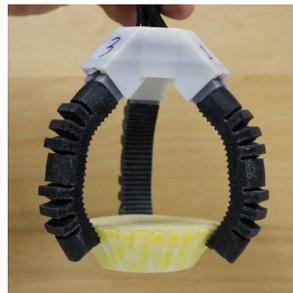
把持や組立、ハンドリングに代表されるマニピュレーションは、ハンドと対象物、対象物と環境との接触を通して成される。したがって、ロボットによるマニピュレーション、すなわちロボットマニピュレーションを実現する上で、接触の理解と制御は重要である。このような観点から、応募者は1985年頃よりロボットマニピュレーションに関する研究を進め、凸多面錐理論を用いて剛体接触を定式化した[1]。2000年頃より、柔軟指による物体操作に関する研究を進め、柔軟指先の平行分布モデルを提案した[2,3]。平行分布モデルを用いて柔軟指のポテンシャルエネルギーを定式化するとともに、柔軟指による把持が安定であることをエネルギーの観点から解明した。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イン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]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[8]。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[9,10]。

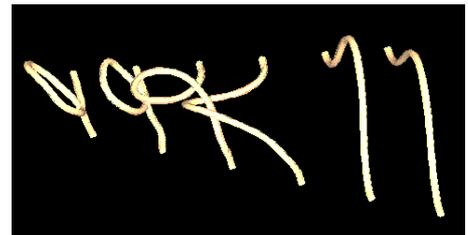
ソフトロボティクスに関する研究は、2002年頃より進めている。跳躍移動ソフトロボットに関する研究[11,12]、変形空気圧アクチュエータに関する研究[13]、布地センサによる滑りセンシングに関する研究[14]、柔軟指先力覚センサ[15]など、ソフトロボティクスに関する研究を幅広く推進している。



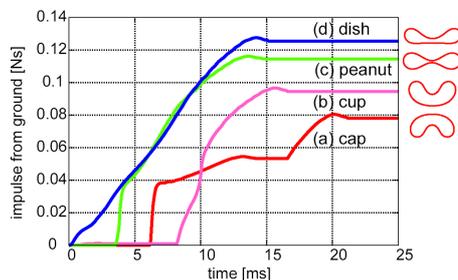
柔軟指先の平行分布モデル[2,3]



ソフトグリッパ[7]



線状物体モデリング[8]



跳躍ソフトロボットの力学解析[12]



滑りセンシング[14]

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。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触覚センサの試作を行った経験がある。また、研究室に、ロボットマニピュレータ VP-6242 (デンソーウェーブ社製) が設置されている。こ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。

参考文献

- [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] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Y. Sugiyama and S. Hirai, Crawling and Jumping by a Deformable Robot, *Int. J. Robotics Research*, 25(5-6), pp.603-620, 2006
- [12] Y. Matsuyama and S. Hirai, Analysis of Circular Robot Jumping by Body Deformation, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1968-1973, 2007
- [13] 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
- [14] V. Ho, M. Makikawa, and S. Hirai, Flexible Fabric Sensor toward a Humanoid Robotic Skin: Fabrication, Characterization, and Perceptions, *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 2013
- [15] D. S. Chaturanga, Z. Wang, Y. Noh, T. Nanayakkara, and S. Hirai, Magnetic and Mechanical Modelling of a Soft Three-Axis Force Sensor, *IEEE Sensors Journal*, 16(13), pp.5298-5307, 2016