

令和 元年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0013

研究課題名（和文）感覚フィードバックと体勢感覚情報の融合による巧みな物体マニピュレーション手法（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Dexterous object manipulation by combining sensory feedback and proprioceptive information(Fostering Joint International Research)

研究代表者

田原 健二 (Tahara, Kenji)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80392033

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,300,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：これまで柔軟指のモデル化では球状などに限られており、形状の議論がほとんどなされていない。そこで一般形状への拡張を目的として、楕円体モデルへの拡張を行った。楕円体をxy-平面へ写像し、写像に対して楕円の幾何中心を求めることで接触面中心位置の導出を行った。また、変位方向を接触面中心位置から垂線方向に取り、変形した楕円体の体積に応じた反力が発生するモデルとして構築した。試作機を用いた接触力・位置を推定するアルゴリズムを提案した。内部を中空とし、内側にビーズを設置した。また、指先力成分を分解して拘束条件を含んだ形で物体座標系での剛性楕円体として導出し、物体中心に目標剛性楕円体を設定できるようにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、柔軟な指先センサの構築を目的として、柔軟モデルの導出を行い、そのモデルをベースとして、非接触センサ（カメラ）を用いた接触センサの試作を行い、それを用いた物体把持アルゴリズムの提案を行った。これまで、指先センサは繊細で高価な物が多く、また、検出された位置や力はノイズや誤差を多分に含むため、どのように物体把持に利用するかについて明示されていなかった。本研究では、安価で簡易な接触センサを提案し、また、それによって検出されるノイズや誤差を含む位置や力情報を利用した物体把持アルゴリズムを提案することにより、多指ハンドによる物体把持をより産業において簡便に利用できるようにした。

研究成果の概要（英文）：Until now, modeling of a soft finger has been limited to a sphere, and there has been no discussion of shape. Therefore, in order to extend it to general shapes, we extend it to an ellipsoidal model. We mapped the ellipsoid onto the xy-plane and derived the contact center position by finding the geometric center of the ellipse for the mapping. In addition, the displacement direction was taken from the center position of the contact surface in the perpendicular direction, and the model was constructed so as to generate reaction force according to the volume of the deformed ellipsoid. We proposed an algorithm to estimate contact force and position using a prototype. The inside was hollow and beads were placed inside. In addition, the fingertip force component is decomposed and derived as a rigid ellipsoid in the object coordinate system in a form that includes constraint conditions, so that the target rigid ellipsoid can be set at the object center.

研究分野：ロボティクス

キーワード：柔軟センサ 触覚 多指ハンド

1. 研究開始当初の背景

多指ロボットハンドで物体を把持する際、指先接触時の衝撃力や過大な把持力による把持物体の破損・変形を防ぐためには、指先が柔軟に変形することが重要である。指先に利用される柔軟材料は、ゴムやウレタンなどの高分子材料が一般的であり、また、接触力を面で受けることができるよう、指先形状を人の指に似せた半球状や楕円体状などの曲面形状に形成することが多い。しかし、柔軟材料や曲面形状を利用するデメリットとして、接触力と変位の関係が複雑な非線形性を持ち、見通しが悪くなるために、把持力や把持物体の位置・姿勢制御が困難になる。また、指先と物体との接触状態が不明瞭となり、摩擦力の測定や推定が困難となるため、初期滑りを正確に検知することは難しい。接触センサについては、これまでひずみゲージ等を用いた力センサや、光ファイバー等の光学技術を用いた接触センサ、また、静電容量の変動を利用した接触センサ等が研究・開発されている。これらのほとんどはセンサ自体が剛体であるため、指先先端部分ではなく、指先の根元部分など実際の接触部分から離れた所へ搭載されることが多い。しかし、計測したい場所と計測点（センサ搭載位置）が離れている場合、計測したい場所とセンサの間のダイナミクスに影響を受け、フィードバック制御を行った場合に振動等の発生原因となりやすいことが知られている。さらに指先を柔軟体で覆った場合は、これら柔軟体の力学も影響するため、不安定現象を引き起こしやすくなる。

2. 研究の目的

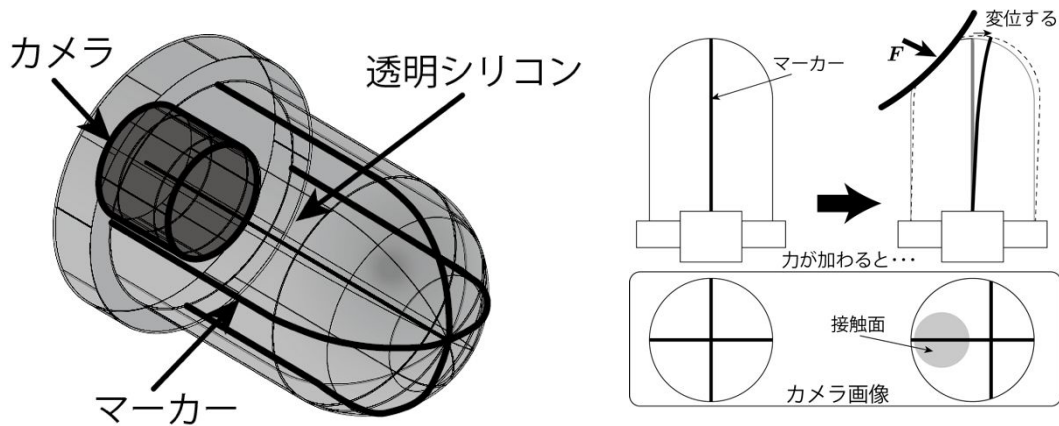
本研究では、柔軟な半球状もしくは楕円体状の指先について、接触力と変形の力学的な関係を定式化し、大変形に対応したモデルを構築する。また、それと並行して力学モデルを基に指先の変形およびそれに伴った接触力を検出・推定するための指先センサの開発を行う。提案する接触センサは、ひずみゲージなどの接触型センサと、レーザ変位センサや画像センサ等の非接触型センサの中間的な構造を持つ。具体的には、透明なシリコンゴムで作成した柔軟指先の内部にカメラを搭載し、そのカメラによって柔軟指先内部に埋め込まれたマーカーを検出する。マーカーは指先の変形に伴ってカメラ座標系内で移動するため、事前にモデル化した変位量と接触力の関係を表す力学モデルを用いて、変位と力を関連づけることにより、大変形に対応した接触センサとして構成する。さらに本センサは、接触面部分のみを検出することにより、転がりや滑りなどによって接触面が移動する場合においても、接触位置を検出することが可能である。柔軟体自体をセンサとして利用できるため、センサ自体が壊れにくく、またコストを大幅に減らすことが可能である。また、非接触型センサであるカメラを変位および接触面検出に利用するため、衝突などによるセンサの破損を防ぐことが可能である。

3. 研究の方法

以下の3つを主な研究課題として取り組む。

- 1) 柔軟指先の大変形を考慮した非ホロノミック転がり接触モデルの構築。
- 2) フィードバックとフィードフォワードが渾然一体となった動的物体把持・操作制御則の構築。
- 3) 構築した制御則の多指ハンドアームシステムへの実装。

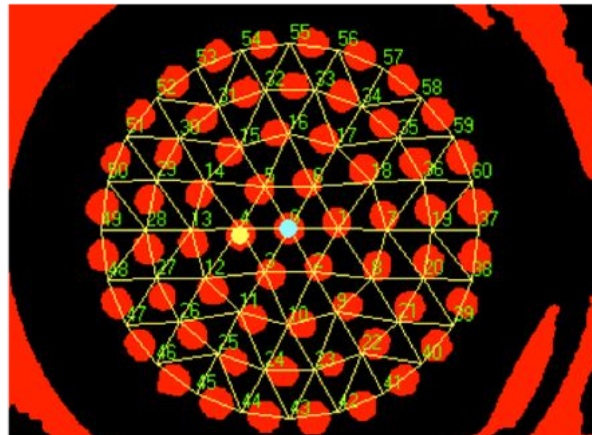
まず、上記2)に関して、視覚もしくは触覚情報により得られた信頼性の低い物体位置・姿勢情報をフィードバックに直接用いるのではなく、一時的な目標値として利用することで、ロバスタかつ正確な把持物体の位置・姿勢制御を行える制御則を提案し、シミュレーションによってその有用性を確認している。また、上記3)に関して、現在、多指ハンドアームシステムの設計・製作を行っており、本年度後半にはそれらを用いた物体把持実験を行う予定である。一方で上記1)については、これまで滑らかな曲面に限定されていた指先の柔軟変形を伴う転がり接触モデルについて、物体のエッジ部分への接触を考慮したモデルへ拡張を行っている。しかし、当初は柔軟指の新しい転がり変形モデルの構築についてのみ注目し、接触力や接触点のセンシングについて考慮していなかった。しかし、上記2)において構築した制御則を実装するにあたり、接触センサの重要性が浮き彫りとなった。当初、市販されている6軸ロードセルを指先の根元部分に搭載して基礎実験を行っていたが、根元部分での計測では、柔軟体のダイナミクスに強く影響を受けるため安定にセンシングすることが難しく、また、非常に高価であるため、実用的とは言い難い。このように、本研究で用いる適当な触覚・力センサがないことから、柔軟指のモデル化のみではなく、触覚センシング機能を持たせた新しい柔軟指自体の設計・製作まで行う必要がある。フィードバック制御とフィードフォワード制御の新しい組み合わせによるロバスタな物体把持・操作手法の開発において、開発した制御則を実装する際に、指先に搭載する柔軟転がり接触が可能な接触センサが必要となるが、これまでのほとんどの接触センサは剛体で構成されており、そのために柔軟体とセンサ自体が別々に指先へ搭載され、接触点と計測点が離れており、柔軟体の非線形なダイナミクスに大きく影響を受けるため、誤差が大きく、また、指先に搭載可能なほどのサイズの6軸ロードセルは高価で繊細であるため実用的とは言い難い。そこで本研究では、新たに透明なシリコンとカメラを用いた柔軟接触センサを開発する。センサ自体が柔軟で、かつ計測に非接触センサ（カメラ）を用いているため衝撃などに頑健であり、また、6軸ロードセルと比較して劇的に安価に作るができる。これにより、これまで多指ハンドにおいて実用性に乏しかった力センサの導入が容易となる。図に示すように、透明なシリコンで形成された指先の根元部分にカメラを埋め込み、内側から接触面方向に向かって画像を取得する。透明シリコン内には、マーカーとして十文字を描くように糸が埋め込ま



れており、指先にせん断力が加わった際に、この糸が基準位置から変位することで力を推定する。十字に糸を配置しているため、捻りによる指先トルクについても十字状の糸の姿勢変化を利用することで計測可能である。さらに、指先が半球状であるため、物体表面上において転がり接触が発生するが、接触面位置を計測することで、転がりによる接触点移動と剪断変形による接触点移動の区別が可能である。また、接触面積を計測することにより、法線方向の接触力も推定可能である。

4. 研究成果

- ・ 関連研究の調査を行った結果、これまで柔軟指のモデル化に関する研究では、導出を容易にするために球状などのプリミティブなものに限られており、また、形状そのものについての議論がほとんどなされてなかった。そこで、共同研究者である Kao 教授の過去の研究成果である柔軟球状モデルを基本として、より一般的な形状への拡張を行う事にした。まずは、一般形状への第一段階として、球状モデルから楕円体モデルへの拡張を行った。柔軟モデルとして楕円体を用いた場合、平面との接触面形状が楕円となり、また、その中心位置は楕円体の中心からずれる。そこで、接触面を表す楕円体を xy -平面へ写像を行い、その写像に対して楕円の幾何中心を求めることで、接触面中心位置の導出を行った。また、柔軟変形による変位量の方法として、接触面中心位置から下るした垂線方向に取ることで、接触面で切断された楕円体の体積に応じた反力が、変位方向へ発生する集中定数化モデルとして構築した。
- ・ 半球状の柔軟指先として利用する接触センサの試作機について、3D プリンタを用いて新たに構築し、柔軟指の内側からカメラで変形を取る事により、その接触力および接触位置を推定するアルゴリズムを提案した。新たに構築した試作機は、これまで透明なシリコンゴムにより中実な半球として作製していたが、今回は中空として変形が容易に起こるようにし、その内側にビーズを埋め込むことで、マーカーを設置した。これにより、比較的自由的なマーカー配置が可能となった。また、外力による変形で移動するマーカーの検出アルゴリズムを提案し、指先が接触しながら把持物体表面上を転がる際の変形パターンから、転がり接触を検出する手法を提案した。一方、物体の把持アルゴリズムとして、指先から物体に加える事ができる力成分について、拘束条件を含んだ形で物体座標系での剛性楕円体として導出し、物体中心に対して目標となる剛性楕円体を設定する事で、把持物体を用いたタスクなど物体が更に外界と接触するような場合において、剛性の方向性を持たせることを目的として新たに物体剛性楕円体として導出した。これを用いる事により、剛性を高くしたい方向および低くしたい方向を物体に設定する事で、把持物体をツールとして利用する場合の運動生成に利用することができる。



5. 主な発表論文等
(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計1件)

1. R. Ozawa and K. Tahara, "Grasp and dexterous manipulation of multi-fingered robotic hands: a review from a control view point," *Advanced Robotics*, pp. 1--21, 2017.

[学会発表](計2件)

1. Choi Seunghyun, 田原健二, "仮想物体位置情報の更新による外力に対してロバストな把持制御手法", SI2016, Dec. 2016.
2. 大藤康平, 河村晃宏, 辻徳生, 田原健二, "外界センサ情報と仮想物体情報の組合せによる未知物体の把持・操作手法の実験的検証", SI2016, Dec. 2016.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

[その他]

なし.

6. 研究組織

研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名: Imin Kao

ローマ字氏名: Imin Kao

所属研究機関名: The State University of New York at Stony Brook

部局名: Department of Mechanical Engineering

職名: Professor, Executive Director of SUNY Korea

[その他の研究協力者]

なし.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。