

# 柔軟・受動機構を活用した低駆動自由度ロボットハンドの開発

著者	西村 斉寛
著者別表示	Nishimura Toshihiro
雑誌名	博士論文要旨Abstract
学位授与番号	13301甲第5014号
学位名	博士（工学）
学位授与年月日	2019-09-26
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/00056485">http://hdl.handle.net/2297/00056485</a>

doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2662086>



柔軟・受動機構を活用した低駆動自由度ロボットハンドの開発

Development of robotic hand with low driving DOF by utilizing flexibility  
and passive mechanism

金沢大学自然科学研究科機械科学専攻

西村齊寛

This paper presents the robotic hand that can grasp wide variety objects. With the remarkable advances in technology related to robots, the scope of application of robots has been greatly expanded. Along with that, the work performed by robots are diversifying. In particular, developments in the field of machine learning have improved the accuracy of recognition of types and shapes of objects, and expectations for the realization of a robot system for grasping and manipulating various types of objects are increasing. The key to its realization is the end-effector that actually handles the object. Specifically, development of a robotic hand that can handle wide variety objects is required. Then, in this paper, we aimed at the development of the universal robotic hand which realizes various kinds of object grasping. Focusing on the robot finger called "fluid fingertip" that has been developed in our research group, we developed a robot hand equipped with a fluid fingertip. First, in order to confirm the usefulness of the fluid fingertip, the mechanism for grasping the fragile object with the fluid fingertip was clarified, and a strategy of grasping without destroying the fragile object was proposed. Next, in order to enable grasping of the heavy load that is the weak point of the fluid fingertip, a rigid mechanism was provided in the fluid fingertip, and a new fluid finger having flexibility and high rigidity was developed. And, in order to grasp various kinds of objects, it is necessary to have various grasping modes, then we also developed a hand structure that can change the posture of the finger passively in contact with the environment. We developed a robot hand capable of grasping a wide variety of objects, and confirmed its performance by grasping experiments and simulations.

深層学習をはじめとする機械学習分野の進歩や、ビジョンセンサ・力覚センサ等の性能向上により、ロボットの知能化が進んでいる。これまで、工場の生産ラインで、同じ位置にある同じ物体をハンドリングするだけであったロボットが、多様な場所でそのシチュエーションに合わせた操作を行うことが可能になってきている。世界的な少子高齢化や国内での「働き方改革」等により、働くことができる人・時間が限られてきていることもあり、今後もロボットの活躍の場が広がっていくことは間違いない。

ロボットが多様なシチュエーションで活躍するための方法として、メカ設計によるアプローチとソフトウェアによるアプローチがある。ソフトウェアによるアプローチとは、上述した機械学習等の知能化技術により状態量を取得・推定することで最適なロボット操作を行う方法である。一方、メカ設計では様々な機構を用いることで、そのシチュエーションに合わせたハンドリングの実現を目指す。本研究でも、物体把持を対象とし、様々な用途で利用できるロボットハンドの開発を行う。

物体把持はロボットが行うタスクの中で、最も基本的な作業の1つである。そして、物体把持を行う際の課題として挙げられるのが多様な物体への対応である。多様な物体がある現場でもそれらの識別精度が低い頃は、それらの物体が混合した状態でハンドリングを行う可能性は高くなかった。しかし、知能化技術の進歩により識別能力は向上し、様々な物体が混合された状態でロボットにハンドリングを行わせる要望も高まっている。多様な物体の把持を行う際に重要となるのがロボットハンドである。知能化技術により、物体の識別を高精度で行うことができるようになったとしてもそれを把持するためのロボットハンドが十分な性能が無ければ把持することはできないためである。例えば、可搬重量が100gのロボットハンドでは3kgの物体は把持できないし、吸着式のハンドでは柔らかい食品等は把持できない。そこで本研究では多様な種類の物体把持が可能なロボットハンドの開発を目指す。

本研究グループではこれまで多様な種類の物体を把持が可能なロボットハンドの要素開発として流体指と呼ばれるロボット指の開発を行ってきた。流体指については指の持つ特性や、実験結果ベースの把持手法の提案を行ってきた。しかし、流体指による物体の把持のメカニズムの解明には至っていなかった。そこで本研究では光弾性法を用いて物体の内部状態を解析し、メカニズムの解明を図る。それにより流体指の有用性への知見を深め、汎用ロボットハンドへの適用を検討する。

流体指は弾性要素を持つため、流体指を搭載したロボットハンドはソフトロボットハンドに分類されるが、ソフトロボットハンドには可搬重量が小さいという課題がある。これは流体指でも同様であり、流体指を用いたロボットハンドも重量物の把持はできていない。そこで可搬重量の向上を目指すべく、流体指に剛体要素を取り入れたハイブリッド構造の流体指を開発することでソフトロボットハンドの課題の解決を目指す。

そして、最後に汎用ロボットハンドを開発するために、ハンド全体の構造について検討を行う。こちらも、これまでのソフトハンドには無かった、剛体と弾性体のハイブリッド構造

により、複数の把持モードを有する構造を提案する。

ロボットが様々なシチュエーションに対応するために、多様な物体を把持できるロボットハンドは数多く存在する。その多くが弾性要素を持つソフトロボットハンドである。これは弾性要素を持たせることにより、対象物の不確かさを吸収した把持が可能となるためである。本研究における不確かさとは、把持対象物ごとに異なる全体的な大きさや部分的な形状、変形のしやすさ等を指す。ロボットハンドに弾性要素を導入する場合、指関節に導入する方法と、物体との接触部(以下、皮膚)に導入する方法がある。関節部に柔らかさを用いたロボットハンドは、一般的に剛体リンクをバネなどの弾性要素を介して接続された構造を持つ。それをワイヤ駆動などで閉じることで物体の形状に合わせたなじみ動作を実現することができる。一方、皮膚に柔らかさを利用したハンドは磁性体を用いたもの、ジャミング転移現象を用いたもの、空圧を用いたものなど様々な形態が挙げられる。また関節にも皮膚にも柔らかさを用いたロボットハンドも存在する。本研究でも、これに分類されるロボットハンドを提案する。

皮膚に受動要素を持つロボットハンドの場合、不確かさの中でも、指と物体の接触面での部分的な形状の違いや、変形のしやすさを吸収することができる。これは特に食品などのように柔らかく壊れやすい物体や複雑な形状を持つ物体を把持する際には効果的である。一方、関節部に弾性要素を導入する場合は、把持モードの変更による把持が可能となる。そのため、物体の全体的な大きさや形状の不確かさを吸収することができる。なじみ動作による把持が代表的であり、物体が球形であっても立方体であっても形状に合わせた把持が可能となる。

このように、柔らかさを皮膚に導入する場合と関節部に導入する場合では、吸収することができる物体の不確かさが異なるため、どちらにも柔らかさ導入することでより汎用的なハンドの開発が可能となる。

また、不確かさを受動要素により吸収できるため、多駆動軸にする必要が無い場合、ソフトロボットハンドの多くが劣駆動となっている。駆動数を減らすことで制御の簡易化が可能なことから、本研究で開発するロボットハンドも複数の把持モードを実現しつつ、アクチュエータの数を減らすために環境を用いて駆動数の削減を目指す。

## ● ソフトロボットハンドの課題

幅広い物体を把持するためには受動要素(柔らかさ)を導入することが効果的である一方で、柔らかさを導入することにより可搬重量が低下するという弱点がある。これは物体の重量により弾性要素が変形してしまうことで把持状態を保てなくなるためである。そのため、ソフトロボットハンドの研究において、重量物の把持は大きな課題である。

本研究で開発するロボットハンドも、皮膚と関節部にそれぞれ柔らかさを導入すると前述したが、それだけでは可搬重量を大きくするのは難しい。そこで、皮膚と関節部に剛体の

要素も追加することで可搬重量の向上を目指す。柔らかさと剛体のハイブリッド構造により、それぞれの長所を生かすことで、柔らかいもの、重いもの、複雑形状のもののような幅広い物体の把持が可能となる。

## ● 研究目的

本研究での、幅広い種類の物体把持が可能なソフトロボットハンドを開発するためのアプローチとしては

- 柔らかさを皮膚と関節に導入することで対象物の持つ不確かさを吸収する。
- 剛体要素も導入することでソフトロボットハンドの弱点を補う。

である。そのために下記の3つの事項を検討した。

### 1. 流体指を用いた物体把持手法の提案

先行研究において、ロボットハンドの指部に弾性膜を張り、内部に流体を充填した流体指を開発した。先行研究では、流体指は豆腐やポテトチップス等の壊れやすい物体を把持可能であることを確認した。流体指は圧力センサを接続することができ、内部流体の圧力をモニタリングすることができる。先行研究では、その流体圧を用いて柔軟物体を把持する手法を提案した。先行研究により、流体指が壊れやすい物体を壊さずに把持する能力が高いことはわかったが、流体指による把持のメカニズムはわかっていない。そこで本研究では、光弾性法を用いて、把持時の物体の応力状態を検証し、メカニズムの解析を図った。その結果、流体指で物体を把持する際、流体指と物体が接触した直後は流体圧は非線形に増加し、ある特定の位置で流体圧の挙動が変化しており、その位置から物体の自由端面が変形し始めているのがわかった。また物体の応力も変化が小さくなっていった。これにより、その位置では指からの力が物体に十分に加わっており、その位置で把持することで物体の破壊も防ぐことができると考えられる。よって、この流体圧の挙動の変化点を検出し、そこで把持することで物体を破壊せずに把持することができる。その変化点を $\Delta RMSE$  という値を用いて検出することに成功した。 $\Delta RMSE$  を用いることで対象物に依らないパラメータ設定も可能となり、流体指の有用性を示すことができた。

### 2. マイクログリッパ内蔵流体指の開発

流体指の弱点である可搬重量が小さい点の改善について検討する。先行研究では流体指で500gの物体を把持可能であることは確認したが、それ以上の物体は把持できていない。これは先述した通り、柔軟な指が物体の重量により大きく変形し、把持をキープできないためである。そこで流体指の内部に剛体部分(本研究ではマイクログリッパと呼ぶ)を設けることで可搬重量の向上を目指した。結果として重量物の把持も可能な流体指の開発に成功し

た。

### 3. 受動回転関節を有するロボットハンドの開発

1, 2 で有用性を確認したマイクログリッパ内蔵流体指を搭載したロボットハンドの開発を行う。流体指を用いることで皮膚に柔らかさを持つため、物体の表面形状に合わせた把持が可能となる。多様な物体の把持を実現するには、物体に合わせた把持モード(ピンチングや包み込み把持等)を選択する必要がある。そのため、指関節にもラチェット構造を用いることで、複数の把持モードを切り替えることができるロボットハンドの開発を目指す。ラチェット構造は回転可能な方向への変位に対して受動的な柔らかさを持ち、回転をロックする方向については剛体的な特性となる。これにより、環境を用いて把持モードを切り替えられるロボットハンドを開発した。開発したロボットハンドが多様な物体を把持できるかを実機実験とシミュレーションにより確認し、その有用性を示した。

## 学位論文審査報告書（甲）

## 1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

柔軟・受動機構を活用した低駆動自由度ロボットハンドの開発

Development of robotic hand with low driving DOF by utilizing flexibility and passive mechanism

## 2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 がな にしむら としひろ  
西村 斎寛

## 3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和元年8月1日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。令和元年8月2日に口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

本論文は、柔軟性、受動性、高剛性を上手く活用することで、多様な種類の物体をハンドリングすることができる次世代ロボットハンドの開発を行い、その有用性を示したものである。まず、流体を充填した指を作成し、その流体圧の挙動をモニタリングすることで、壊れやすい物体を事前知識なしで壊さずに把持する手法を開発した。その適用範囲は、軽量物体に限定されている。そこで、指を構成する流体内部に小型のグリップを配備することで、壊れやすい物体をハンドリングする機能はそのままに、重量物まで把持できるロボット指を開発した。次いで、このロボット指を搭載し、関節にラチェット機構とバネを組み込んだ受動関節を設けることで、環境との接触を活用して一つのモータで、パラレルグリップ、ピンチング、包み込みの三つの把持モードを実現するロボットハンドを開発し、絹ごし豆腐から2リットルペットボトルに至るまで68種類以上の物品のハンドリングを実現した。以上に示すように、本論文は、ロボット工学への貢献度が高いと評価できる。よって、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格(2) 授与学位 博士（工学）