

# 狭隘空間での作業を容易にする折りたたみ機構を備えた 単指薄型ロボットハンド

Development of thin robotic hand with a single finger equipped with folding  
mechanism that facilitates operations at narrow spaces

○学 無量江 翼 (金沢大) 正 西村 齊寛 (金沢大)  
朝間 由龍 (パナソニック) 池内 宏樹 (パナソニック)  
戸島 亮 (パナソニック) 正 渡辺 哲陽 (金沢大)

Tsubasa MURYOE, Kanazawa University, muryoue283@stu.kanazawa-u.ac.jp  
Toshihiro NISHIMURA, Kanazawa University  
Yoshitatsu ASAMA, Panasonic Corporation  
Hiroki IKEUCHI, Panasonic Corporation  
Ryo TOSHIMA, Panasonic Corporation  
Tetsuyou WATANABE, Kanazawa University

A thin robotic hand with only one finger is presented for grasping operations at narrow spaces. The single robotic finger has the two operation modes. The one is the insertion mode, and the other is the grasping mode. The switching of the operation mode was accomplished by rotating the motor attached on the hand unidirectionally only. Another way for the switching is that a fingertip is passively rotated via a contact with a table or surrounding, followed by active motor rotation to complete the switching. The effectiveness of the developed robotic hand and its control methods are validated by several experiences.

**Key Words:** Robot, Mechanism, Robot Hand, Narrow Space

## 1. 緒言

本論文では狭い作業空間に対応する新しい薄型形状のロボットハンドを紹介する。実空間では、箱の中の物体を手を取る、他の物体に囲まれた物体を掴むなど、狭い空間での物体の取り扱いの要求が高くなる[1][2]。これらの作業を実現するためには2つのステップが必要である。1つ目は対象物と周囲の狭い空間にロボット指を挿入し、必要に応じて把持できるスペースを確保する事。2つ目は対象物を把持して拾い上げる事である。狭い空間に指を挿入するのであれば指を細く設計することが望ましい。また、ロボットハンドが占有する空間は最小であることが望ましい。限られた作業空間で作業を行うため、ロボットハンドができるだけ広い作業空間を使えるようにし、狭い空間での作業を容易にしたい。このためにロボットハンドの占有領域は出来る限り小さく、出来ることならロボットハンドの指の本数を最小限にしたい。そこで本研究では、狭い空間でも作業可能な幅の細い単指のロボットハンドを開発することを目標とした。単指で物体を把持するためにロボットハンドの指に折りたたみ機構を搭載した。開発したハンドの基本動作を図1(a)に示す。また、グリッパを利用した動作を図1(b), (c)に示す。挿入モードでは、指は薄型形状をとって挿入される。挿入後、ハンドを構成するリンクを折りたたみ、ロボットハンドの表面にグリッパを構築する。これを把持モードと呼ぶ。構築されたグリッパで対象物を把持し、拾い上げる。このモード切り替えと把持動作を1つのモータで実現している。加えて、モード切り替えの方法が2種類ある。両者の違いは指先(図1(a)の下指)を能動的に回転させるか? 受動的に回転させるか?にある。能動的にモード切り替えを行いたい場合、モータを一方に能動的に回転すればよい。一方で、部分的に受動的に切り替えたい場合は、モータの電源をOFFとして、指先をテーブル面などに押し付けて、指先を受動的に回転させる。これにより、把持モードにおける下指の形態を構成できる。この能動的切り換えを用いて物体把持を行った例を図1(b)に示す。この後、モータの電源をONにしてモー

タを回転させることで、上指の形態を把持モードに変化させることでモードの切り替えが実現できる。この部分的受動切り換えを使って上部と側面が一部障害物に遮られた物体を取り出した例を図1(c)に示す。対象となる物体の周辺物になじみながら指先を対象物体の底に挿入できるため、どれだけ指

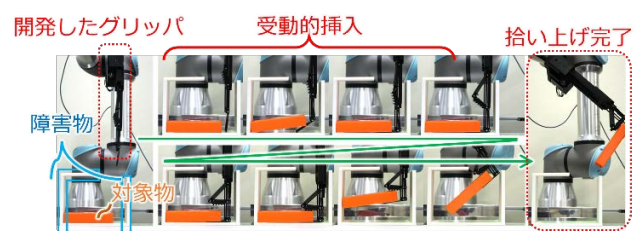
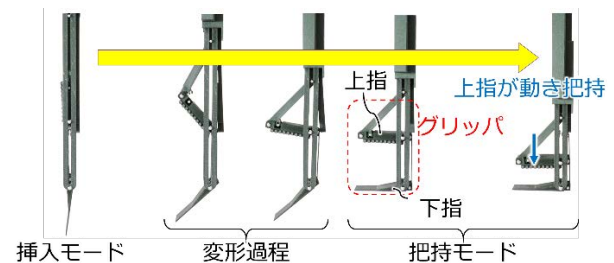


Fig.1 Overview of the developed robotic hand and operations with it

先を降ろせば良いか不明であっても挿入作業が容易な制御を実現できる。狭い作業空間に適したモード切り替え法である。

本研究では、以上に示したような薄型単指ロボットハンドの開発を目指す。

## 2. ロボットハンドデザイン

### 2.1 機能要件

開発したロボットハンドの機能要件は以下の通りである。

1. 挿入モードと把持モードがアクチュエータ1つで切り替え可能であること。
2. 挿入モードでの厚みが 10mm 以下であること。
3. 把持可能な物体の重量が 1.5kg 以上であること。

### 2.2 構造

図 2 に開発したグリップの 3D-CAD モデルを示す。グリップは固定台 (図 2(a)の緑色部分)、ロボット本体 (図 2(b)の緑色部分)、ピニオンギア付きモータ (黒色部分)、スライドベース (赤色部分)、4 種類のリンク、スライドピンと 5 本のコネクトピンから構成される。4 つのリンクは上段 (藍色部分)、中段 (紫色部分)、下段 (桃色部分)、指先 (橙色部分) から構成される。これらのリンクはコネクトピンを介してスライドベースと直列に接続されている。指先リンクの厚さは 1.0mm で、狭い場所にも指を入れることができる。スライドベースにはラックギアが内蔵されており、モータで回転するピニオンギアと相対的に移動する。図 2(b)に 4 リンクによって、挿入・把持モードの切り替えと把持動作を行う上で重要な構造を示す。下段リンクには 4 リンクの動作が挿入・把持モードの切り替えを行うための突起付きの長穴がある。固定台はガイドレール、バックカバー (図 2(b)の水色の部分) から構成される。図 1(a)の上指は上段リンク、中段リンクから構成される。上指の形を維持するために、上段リンクにはスプリングクリップを用いたロック機構、中段リンクにはそれを受けるバーを取り付けた。

開発したグリップでは状況に応じて使い分け可能な 2 つのモード切り替え法がある。1 つ目はモータの駆動のみでモード切り替えを能動的に行う方法である。2 つ目は指先リンクを支持面に接触させて受動的に回転させて下指を構成し、残りの上指をモータ回転にて構成する方法である。後者は対象物の下に指先を挿入する際に、どの程度指先を回転させることで挿入できるか不明瞭な場合に有効である。まず前者の方法を紹介する。図 3 にモータの駆動のみでモード切り替えを行う方法を示す。図 3 ではモータの回転によりラックピニオン機構を介してスライドベースを下方に移動させたときの直列に連結されたリンクの挙動を表している。はじめに、中段リンクに取り付けられたスライドピン (図 2(a)) がガイドレールの溝穴に沿って平行移動する。この移動により上段リンクと中段リンクの形状が変形する。この変形により下段リンクが後方へ移動する。このとき、指先リンクは下段リンクの移動に連動して回転する。その後、中段リンクがガイドレールに対して直角になるまでスライドピンを移動させるとピンの移動は停止する。この停止により、中段リンクのバーが上段リンクのスプリングクリップにはまり、グリップの上指が形成される。加えて、下段リンクに動きに連動して指先リンクが 90 度回転し、下指を形成する。スライドベースをさらに移動させると中段リンクのコネクトピンが下段リンクを変形させ、下段リンクの突起を乗り越え、最終的に突起の下方に移動する。対応して、形成された上指も突起の下方に移動する。バックカバーが下段リンクの併進移動を拘束し、指先リンクの姿勢は把持モードにて維持される。モード切り替え後はモータ制御により上指を動かすことでグリップを開閉する。

次に、支持面との接触によるモード切り替えについて説明する。狭い作業空間では指先が動く範囲は限られており、指先を対象物の下に差し込み、すくい上げるように把持することが有効である。この挿入は能動的なモータの駆動で行うことができるが指先のセンシング、認識、制御が必要である。この戦略は狭い作業空間では困難である。そこで、開発したグリップでは、グリップ本体を下方に移動させるだけで指先を対象物の下に挿入することができるように設計した。このとき、指先リンクは支持面との接触により受動的に回転するように設計されている。図 4 に支持面との接触を利用したモード切り替えの方法を示す。まず、モータのトルクをオフにする。開発したグリップを取り付けたマニピュレータを下方に移動させる。指先リンクが支持面に接触した後、直列に接続されたリンクを通じて接触力がモータに伝達される。モータが受動的に回転し、スライドベースも受動的に下方に移動する。このスライドベースの移動により、指先リンクが受動的に回転し、指先リンクが対象物の下に挿入可能になる。その後、モータをオンにして能動的に回転させ、スライドベースを下方に移動させる。このスライドベースの移動により、上指が形成され把持モードに切り替わる。この手順は、能動的モード切り換えの方法と同じである。なお、この手法では、指先リンクを挿入できる十分なスペースがあり、物体が支持面上を滑ることができれば、受動的な指先リンクの回転によって把持のための空間を作り出すことができる。

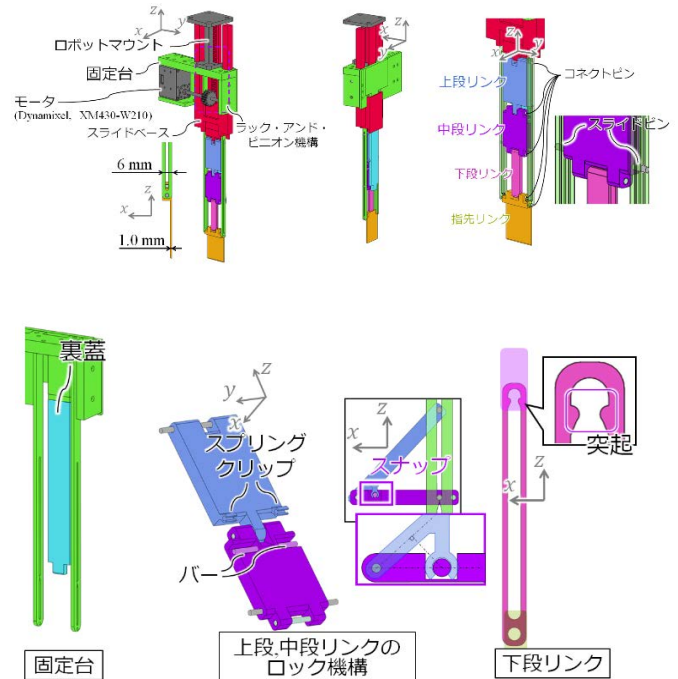
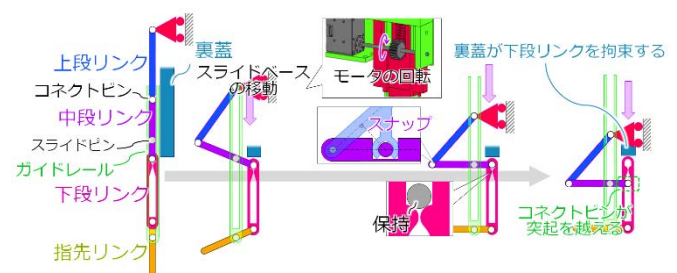
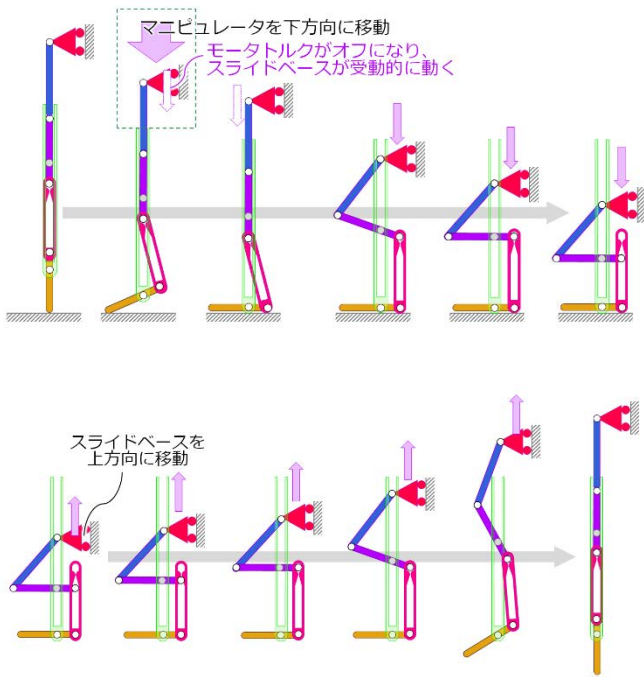


Fig.2 3D-CAD model







最後に、把持モードから挿入モードへの切り替え方法について説明する。図5にこの方法を示す。開発したグリップはスライドピンまたはスライドベースを上方に移動させるだけで切り替えができるように設計されている。上方へ移動することで、中段リンクの接続ピンが下段リンクの突起を乗り越える。その後、下段リンクの突起が接続ピンの動きを拘束することで、下段リンクが一時的に停止し、上段リンクと中段リンクが上指の形状から元の状態へと戻る動きを励起する。これに伴い、ロックされていたスプリングクリップからバーが切り離される。その後、下段リンクが元の状態に戻り、下段リンクの動きに連動して指先リンクも元の状態に戻る。

今回開発したロボットハンドのモード切り替えと把持動作のための重要な構成要素は、スプリングクリップ構造を含む突起構造とリンク長可変の平行リンクである。突起構造により、負荷に応じたリンクの不連続な動き（負荷の値が閾値を超えない限りリンクの動きが止まる）を実現し、所望の順序での変形を実現している。この変形により、把持動作のためのガイドレール、中段リンク、下段リンク、指先リンクからなる平行リンク機構が構成される。下段リンク、ガイドレールともに、スライドピンと接続ピンの動きによってリンクとなる部分の長さが増えるが、それ以外の方向の動きは4節リンク構造のピンまたは関節の配置によって拘束される。これにより、平行グリップのような把持動作が可能となる。

### 3. 実験による評価

#### 3.1 狭い作業空間での把持

ここでは、対象物を把持するために指先が入る空間の最大幅を求める実験について説明する。実験のターゲットは図7(a)に示すように指先が挿入される空間の幅 $w_1$ と、挿入された空間の反対側にある空間の幅 $w_2$ とした。挿入のための $w_1$ と $w_2$ の条件を得るために $w_1$ の値をいくつか変えて把持実験を行った。実験において対象物が自由に移動できるように、挿入される空間の反対側には障害物を置かなかった。実験ではグリップを空間に挿入し、指先の受動的な回転を利用して対象物（発泡

スチロール製トレイ）を把持した。実験結果は以下の2つのケースに分類される。(1)  $4 \leq w_1$  の場合：部分的受動モード切り替えにより把持が実現できた。指本体の厚さ $w_{body}$ は6mmであり、 $4 \leq w_1 < 6$  の場合、指を挿入すると、指が対象物を横にスライドさせて、挿入のための空間を広げることが分かった。この受動的な指先の回転を伴う挿入とその後のモード切り替えによる把持戦略が図7(b)に示す戦略1である。(2)  $1 \leq w_1 < 4$  の場合：指本体を挿入することはできないが指先を挿入することはできる。そこで、図7(b)に示す戦略2を採用した。狭い空間に指先を挿入し、その後グリップを水平方向に移動させた。これにより、対象物を移動させ、指本体を挿入できる空間をつくった。その後、指先を対象物の下に挿入し、モードを切り替え、最終的に対象物を把持することに成功した。以上の結果から $w_1 + w_2 > w_{body}$ を満たせば、狭い空間に指先を挿入し対象物を把持できることがわかった。加えて、 $w_1 < 1 (= w_{tip})$ では挿入できないこともわかった。

#### 3.2 耐荷重

開発したグリップの耐荷重を検討した。図8(a)に実験装置を示す。荷重は把持モード時の指先リンクに装着したフォースゲージから得た。このとき荷重の作用点は、指先リンクの回転軸（接続ピン）から12mm離れた位置とした。この実験

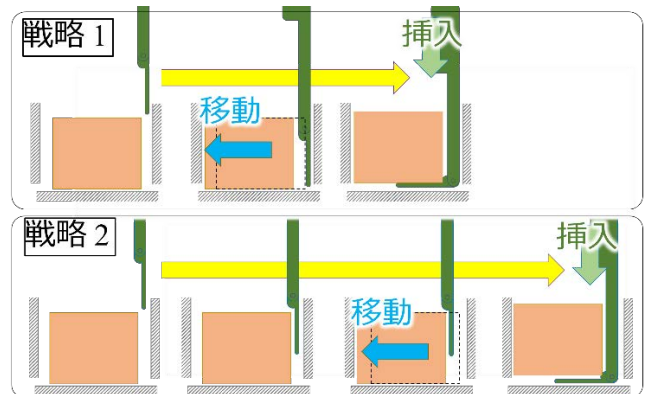
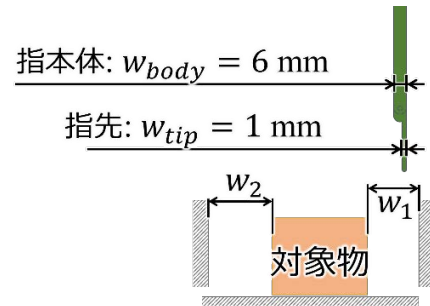


Fig.7 Space required for grasping



Fig.8 Load capacity



#### 4. 結言

本研究では、挿入モードと把持モードの2つの動作モードを利用した狭小空間における物体把持のための単指ロボットハンドを開発した。

#### 参考文献

- [1] S. H. Cheong, B. Y. Cho, J. Lee, C. H. Kim, and C. Nam, “Where to relocate?: Object rearrangement inside cluttered and confined environments for robotic manipulation,” *arXiv*, pp. 7791–7797, 2020.
- [2] C. Eppner *et al.*, “Lessons from the Amazon Picking Challenge: Four Aspects of Building Robotic Systems,” *IJCAI*, Aug. 2017, pp. 4831–4835

では 18.6N の荷重をかけると、下段リンクが曲がり指先リンクとフォースゲージの間でスリップが発生した。その結果、開発したグリッパの最大耐荷重は 18.6N だとわかった。なお、耐荷重は指先を曲げるのに必要なモーメントから決まる。リンクの軸から荷重の作用点までの距離が長くなる程、耐荷重は減少する。耐荷重を増加するには指先の厚みを厚くする必要がある。そのため、指先の厚さは対象となる狭い空間や対象物の重さに応じて調整を行わなければならない。

#### 3.3 把持試験

開発したグリッパを評価するために把持試験を実施した。この試験ではグリッパを位置決めステージに取り付け、テーブルの上に置かれた対象物を把持した。対象物は以下の通りである。(1) 食肉包装用発泡スチロールトレイ (250g)。(2) パウチカレーが入った長方形の紙箱。(3) 海苔が入ったラミネートパウチ。(4) 複雑な形状のプラスチックストロベリー。図 9 に示す様に、試験では様々な特徴を持った対象物を把持することができた。紙箱とイチゴのテストでは、グリッパの反対側に障害物を置き、挿入時の物体の滑りを防止した。挿入時に滑りが発生する場合、アプローチポイントや障害物の位置を考慮する必要がある。さらに、図 1(b)に示したように構築したグリッパは、従来の平行グリッパと同様に対象物を把持できた。

#### 3.4 動作試験

開発したグリッパを評価するために、実環境を想定した以下の二つの動作試験を実施した。(1) 箱の中に詰め込まれたものを拾い上げる。(2) 上面と側面を部分的に囲まれた狭い空間で物体を拾い上げる。結果を図 1(b)と図 1(c)に示す。前者の試験では、グリッパを能動的に構築し箱の中に詰め込まれた対象物を拾い上げた。後者の試験を従来の平行グリッパで行うと、作業スペースが限られているため対象物にグリッパを接近させることができない。そのため、狭い場所での把持が困難であった。これに対し、開発したグリッパでは、挿入モードで指先を対象物の下に挿入し、把持モードで対象物の側面に接近しながら把持することで対象物のピックアップに成功した。