

# 爪を有する多指ハンドの把持計画

## Grasp Planning for a Multi-fingered Hand with Nails

○ 馬場 恒星 (九大) 正 辻 徳生 (九大) ピョ ユンソク (九大) 正 倉爪 亮 (九大)  
諸岡 健一 (九大) 正 長谷川 勉 (熊本高専) 正 原田 研介 (産総研)

Kosei Baba, Kyushu University, baba@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp  
Tokuo Tsuji, Kyushu University  
Yoonseok Pyo, Kyushu University  
Ryo Kurazume, Kyushu University  
Ken'ichi Morooka, Kyushu University  
Tsutomu Hasegawa, Kumamoto National College of Technology  
Kensuke, Harada, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

We aim to develop a multi-fingered hand which grasps various objects. We develop a finger equipped with soft fingertip and two layers nails. The first layer of the nails is thin and long. It is possible to insert it into the bottom of the object. The second layer of the nails is thick and short. It supports the elastic force of soft fingertip. We develop a planner for selecting a grasp style according to the height of the object. The planner can grasp a low height object by using a multi-fingered hand. We demonstrate the feasibility of the proposed method with simulation. In addition, it is shown that the developed hand can grasp various objects through experimental results.

**Key Words:** Robot hand, Grasp planning, Life support

### 1 緒言

日常生活空間で働くサービスロボットにとって、物体の運搬は重要なタスクの一つである。日常生活空間には様々な大きさ/形状の物体が存在し、机や床などの平面上に置かれている。したがって、平面上に置かれた多様な物体を把持する必要がある。特に薄い物体が置かれている場合は半球状の指先で把持することは難しい。多様な物体を把持できる多指ハンド [1, 2] が開発されてきたが、その多くは薄い物体の把持は対象としていない。

平面上に置かれた高さの低い物体を把持する方法として、物体の下部に爪を差し込む方法が考えられる。指先に爪を有する多指ハンド [4, 5] も開発されているが、差し込み動作による把持動作は実現していない。また、指先の凹凸で薄い物体を引っ掛けるハンド [3] も開発されているが、1つの指先は寝かせる必要があるため把持可能な物体の大きさに制限があり、さらに持てる対象の厚みにも制限がある。

本論文では、爪を有する多指ハンドにより多様な物体の把持を実現する。そのために、把持形態の選択法と爪を差し込む把持動作計画法を提案する。さらに、指先が柔軟であり爪が2層構造になっている多指ハンドを開発する。1層目の爪は薄く指の先端より長いので、物体の下部に差し込むことが可能である。2層目の爪は厚く指先と同じ形になっているため、柔軟指先が物体に加える弾性力を支える役割をもつ。実機実験を行い、提案手法に基づく把持が可能であること、および爪の利用が把持に有効であることを示す。さらに、開発した多指ハンドが多様な物体を把持できる汎用性を有していることも実証する。

### 2 把持形態

本論文では、平面上に置かれた物体に対する把持を扱う。まず、複数の把持形態について述べ、物体に応じた把持形態を選択する手法について説明する。

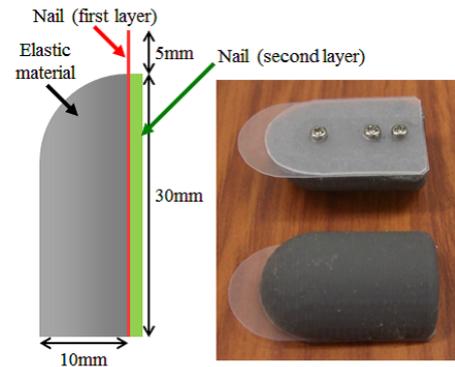


Fig.1 Fingertip with Nails

#### 2.1 把持形態の定義

これまでに、把持形態の分類方法が多数提案されている [6, 7, 8]. 本論文では、Napier による分類 [9] を利用する。このうち、power grasp を握力把持と呼ぶこととする。さらに、指の先端部のみが物体に接触する場合とそうでない場合とで precision grasp を区別し、それぞれ指先把持/指先把持と呼ぶこととする。本論文で扱う把持形態は、握力把持/指先把持/指先把持の3種類とする。

#### 2.2 把持形態の選択

原田ら [10] によって提案された把持形態の選択法を拡張する。まず、把持形態の優先順位を決定する。握力把持は物体を包み込むため、最も安定な把持形態である。指先把持は指先把持に比べて物体と指との接触面積が広く、より安定な把持形態である。よって、把持形態の優先順位を、1. 握力把持, 2. 指先把持, 3. 指先把持とする。

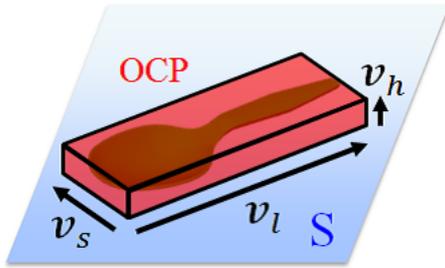


Fig.2 OCP of a spoon

以後、物体の置かれた平面を  $S$  と表す。物体が平面  $S$  上に置かれていることから、OCP は平面  $S$  に面で接する直方体とする。例として、スプーンの OCP を図 2 に示す。図中の  $v_h \in \mathbb{R}^3$  は、平面  $S$  と垂直な OCP の辺を表すベクトルである。また、 $v_l, v_s \in \mathbb{R}^3$  は、OCP の底面の長辺/短辺を表すベクトルである。

OCP が平面  $S$  に接していることから、その高さ  $\|v_h\|$  に着目し、 $h_1, h_2, h_3$  を、それぞれ握力把持/指先把持/指尖把持が可能となる、最小の  $\|v_h\|$  とする。これらは、使用する多指ハンドに合わせて事前に定義する。先に述べた把持形態の優先順位に基づき、条件を満たす把持を選択する。

### 3 指尖把持計画

#### 3.1 多指ハンドの条件

指尖把持を行う多指ハンドは、以下の条件を満たしているものとする。

- 指は 3 自由度以上であり、接触点位置を選択できる。
- 指先は柔軟である。物体に接触したときに、弾性変形し弾性力を利用して把持する。
- 物体の下部に差し込むことが可能な、柔軟な爪を有する。

#### 3.2 用語の定義

次節以降において使用する用語の定義を行う。

#### 3 指/2 指指尖把持 3 本指/2 本指を用いた指尖把持

**親指/人差し指/中指** 親指は人差し指および中指と対向しているとする。2 指指尖把持には親指/人差し指を用いる。

**3 指/2 指標準姿勢** 3 指/2 指指尖把持計画における指の標準姿勢。使用する多指ハンドに合わせて事前に定義する。3 指/2 指標準姿勢の一例を図 3 に示す。

**指先三角形** 3 指標準姿勢における、各指の先端を頂点とする三角形。図 3(a) において、指先三角形を赤色で示している。

**3 指指尖ベクトル  $v_{p3}$**  3 指指尖把持計画における、指先の動く方向を示すベクトル。3 指標準姿勢において、人差し指の先端から中指の先端に向かうベクトルを  $v \in \mathbb{R}^3$  とする。指先三角形の法線を軸として、 $v$  を  $90^\circ$  回転させたベクトルを  $v_{p3} \in \mathbb{R}^3$  とする (図 3(a))。

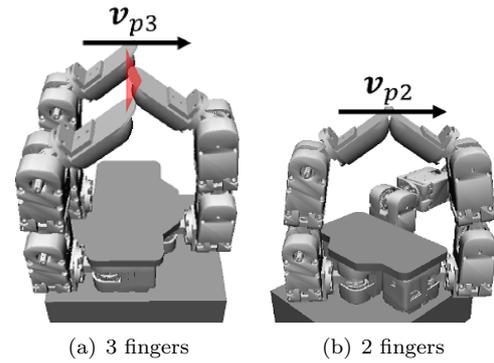


Fig.3 Standard pose

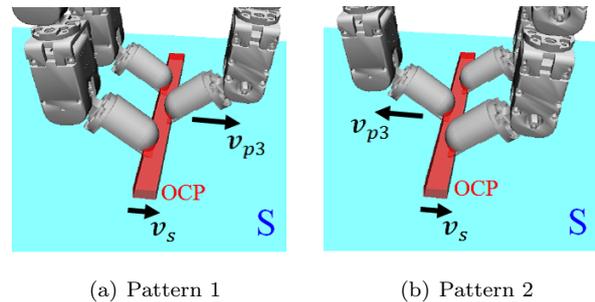


Fig.4 Patterns of hand position/posture

**2 指指尖ベクトル  $v_{p2}$**  2 指指尖把持計画における、指先の動く方向を示すベクトル。2 指標準姿勢において、親指から人差し指に向かうベクトルを  $v_{p2} \in \mathbb{R}^3$  とする (図 3(b))。

#### 3.3 計画手法

はじめに、指尖把持に用いる指の本数を決定する。次に、手の位置姿勢を決定する。最後に、指先の位置を決定する。各把持姿勢に対し force closure に基づく評価を行い、安定していない把持を除外する。

##### 3.3.1 指の本数の決定

3 指標準姿勢における人差し指-中指間の距離を  $d$  とする。 $d$  が OCP の底面の長辺より短い場合、3 本とする。すなわち、3 指指尖把持計画を行う条件は次式となる。

$$d < \|v_l\| \quad (1)$$

物体が小さい場合は上式が満たされないため、2 指指尖把持計画を行う。

##### 3.3.2 手の位置姿勢決定

3 指/2 指指尖把持計画において、手の位置姿勢を決定した例を図 4 に示す。把持対象物を OCP で表し、指先で OCP を挟み込む形となる。また、物体の下部に爪を差し込むために物体の置かれた平面  $S$  に指の先端が接する。一般的に物体の長辺を挟み込む把持の方が短辺よりも安定するため、先に試行する。

3 指指尖把持の場合について、手法の詳細手順を述べる。

1. 指を 3 指標準姿勢にする。

2. 物体の重心を平面  $S$  上に投影した点を  $P$  とする. 指先三角形の重心と点  $P$  が一致し, 指先三角形と平面  $S$  が平行になるように, 手を移動させる. このとき, 指の先端が平面  $S$  に接する.
3. 指の開閉方向  $v_{p3}$  と OCP の水平方向の短い軸  $v_s$  が平行になるように, 手を回転させる. このとき, 図 4 に示すように手の位置姿勢が 2 パターン定まる.
4. 定まった手の位置姿勢 (2 パターン) について, それぞれアームの逆運動学を解く. 1 パターンのみ解が求まった場合, その位置姿勢を採用する. 2 パターンとも解が求まった場合, 腕関節の総回転量が小さいものを採用する.
5. 解が求まらなかった場合は, 鉛直軸周りに 90 度回転して把持姿勢を求める.  $d < \|v_s\|$  が成り立つ場合,  $v_{p3}$  と  $v_l$  が平行になるように手を回転させ, 同様にアームの逆運動学を解く. 解が求まれば採用する.

2 指指尖把持の場合は, 以下のように置き換えて考える. また, 手順 5 は省略する.

- 3 指標準姿勢 → 2 指標準姿勢
- 指先三角形の重心 → 親指と人差し指の間差点
- $v_{p3} \rightarrow v_{p2}$

### 3.3.3 指先の位置決定

図 5 の step 1 は, 図 4 の指先を横から見た状態を表している. この状態から, 物体から離れるまで指先を徐々に外側へ移動させる (図 5 の step 1~3). これは, 物体の置かれた平面と指の先端との接触を維持しながら行う. 最後に指先を内側へ移動させ, 物体に弾性力を加える (図 5 の step 3~4).

1 つの指先位置を決定する手法の詳細手順を述べる. 把持に用いるすべての指について, 同様の処理を行う. なお, 指の自由度を  $n$  とする.

1. 指先の微小移動ベクトル  $\Delta r \in \mathbb{R}^3$  を定める (図 5 の step 1). これは, 指尖ベクトル  $(v_{p3}, v_{p2})$  に平行かつ物体に対し外側を向くようにする.
2. 指関節の微小回転量  $\Delta \theta \in \mathbb{R}^n$  を次式により計算し, 指関節を回転させる.

$$\Delta \theta = J_p^\# \Delta r \quad (2)$$

$J_p \in \mathbb{R}^{3 \times n}$  は指のヤコビ行列で関節角と指先位置の関係を表す.  $J_p^\#$  は  $J_p$  の疑似逆行列であり,  $n = 3$  の場合  $J_p^\# = J_p^{-1}$  となる.

3. すべての関節が可動範囲内に収まっているかチェックする. 可動範囲を超えた関節がある場合, 計画失敗とする.
4. 指先と物体が接触している場合, 手順 2 に戻る.
5.  $\Delta r$  を逆方向に置き換える (図 5 の step 3). 事前に定めた目標変形量を達成するように, 手順 2 を数回繰り返す. 指先と物体を接触させる. (図 5 の step 4).

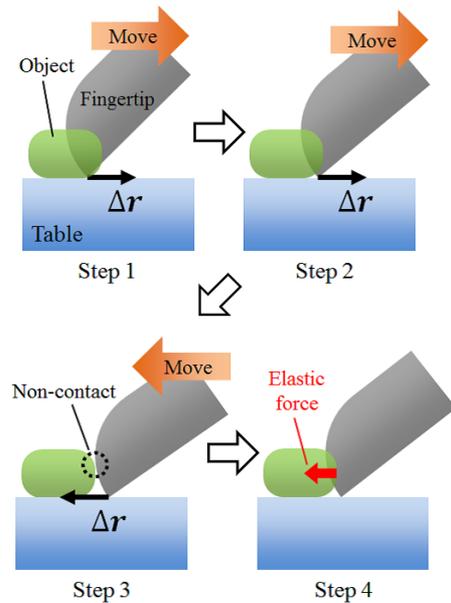


Fig.5 Decision of fingertip position

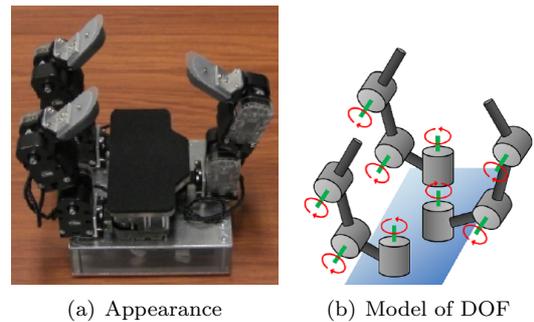


Fig.6 Developed multi-fingered hand

## 4 実験

### 4.1 多指ハンドの構成

本研究において開発した多指ハンドを図 6(a) に示す. 3 自由度の指を 3 本有し, 計 9 自由度である (図 6(b)). 関節には ROBO BUILDER 社製のサーボモータ “SAM-5” を利用した. 指を伸ばしたとき, 手のひらから指の先端まで約 100mm である.

指先の外観および構造を図 1 に示す. 指先は四半球であり, 柔軟なウレタンゲルを利用した. 爪は 2 層構造になっている. 図 1 のうち, 赤色で示した部分が 1 層目, 緑色で示した部分が 2 層目である. 1 層目は薄い樹脂のシートを利用し, 指の先端より 5mm 長くした. この爪を指尖把持において物体の下部に差し込む. 2 層目は厚みのある樹脂のシートを利用し, 指先と同じ大きさとした. これは, 指先が物体に接触したときに生じる弾性力を支える役割をもつ.

### 4.2 指尖把持

指尖把持が選択されるカード/コイン/スプーン/消しゴムを把持対象物とする. 実機実験の結果を図 7(a)-(d) に示す. 指を開いた状態で手のひらを物体の上に移動させた後, 指を閉じて把持し, 物体を上方向へ持ち上げた. カード/

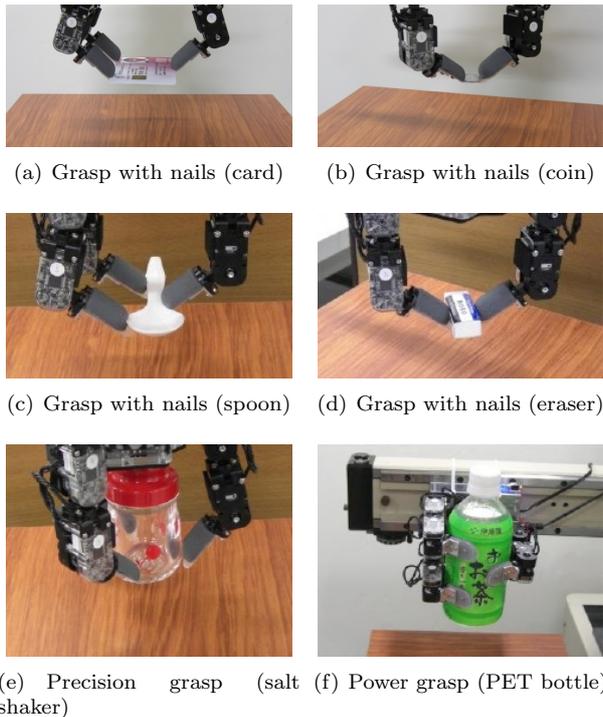


Fig.7 Result of grasping

スプーンは3指指尖把持が選択された。コイン/消しゴムは式(1)を満たさないため、2指指尖把持が選択された。

指尖把持において、1層目の爪がある場合とない場合でforce closureを用いた安定性評価を行い比較した。ウレタンゲルの指先と爪で、それぞれ別の接触点として計算する。カードを把持対象物とした場合、1層目の爪を用いるとforce closure条件を満足するが、爪を用いない場合はその条件を満たさなかった。したがって、安定の把持のためには、1層目の爪が必要であることが分かる。

実機でも差込用の爪の効果を検証した。1層目の爪を外して鉛筆の把持実験を行った結果、上方向へ持ち上げることができなかった。指を閉じたとき鉛筆の下に差し込まれた爪は、鉛筆を下から支える役割をもつ(図8(a)の赤丸)。爪が無い場合、指を閉じたとき鉛筆を支えることができず、把持することができない(図8(b))。この結果から、物体の下部に爪を差し込むことの有効性が示された。

#### 4.3 指先把持

指先把持が選択される胡椒瓶を把持対象物とする。把持計画の結果を図7(e)に示す。原田らの手法[10]による把持計画を行った後、指先が約2mm変形するように関節角を調整した。指を開いた状態で手のひらを胡椒瓶の上へ移動させた後、指を閉じて把持した。その状態から、胡椒瓶を上方向へ持ち上げられることを確認した。

#### 4.4 握力把持

握力把持が選択されるペットボトルを把持対象物とする。把持姿勢を図7(f)に示す。指を開いた状態で手のひらをペットボトルに接触させた後、指を閉じて把持した。その状態から、ペットボトルを上方向へ持ち上げられることを確認した。なお、このペットボトルは水で満たしてあり、重さは約350gである。

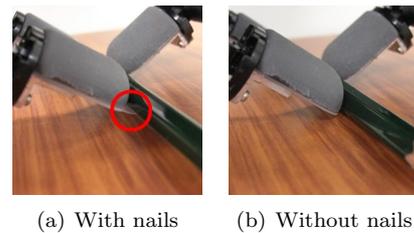


Fig.8 Effect of nails

## 5 結言

多様な物体の把持を目的として、把持形態の選択および指尖把持計画の手法を述べた。爪を有する多指ハンドを用いて、握力把持/指先把持/指尖把持が可能であることを実証した。指尖把持において、物体の下部に爪を差し込むことの有効性を示した。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 24700194 の助成を受けたものです。

## References

- [1] J. H. Bae, S. W. Park, J. H. Park, M. H. Baeg, D. Kim, and S. R. Oh, "Development of a Low Cost Anthropomorphic Robot Hand with High Capability", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4776-4782, 2012.
- [2] I. Yamano and T. Maeno, "Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2684-2689, 2005.
- [3] L. U. Odhner, R. R. Ma, and A. M. Dollar, "Precision Grasping and Manipulation of Small Objects from Flat Surfaces using Underactuated Fingers", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2830-2835, 2012.
- [4] K. Murakami and T. Hasegawa, "Novel Fingertip Equipped with Soft Skin and Hard Nail for Dexterous Multi-fingered Robotic Manipulation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.708-713, 2003.
- [5] T. Morita, H. Iwata and S. Sugano, "Human Symbiotic Robot Design based on Division and Unification of Functional Requirements", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2229-2234, 2000.
- [6] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.5, No.3, pp.269-279, 1989.
- [7] 鎌倉, "手のかたち手のうごき", 医歯薬出版株式会社, 1989.
- [8] T. Iberall, "The nature of human prehension: Three dextrous in one", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.396-401, 1987.
- [9] J. Napier, "The prehensile movements of the human hand", *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol.38B, No.4, pp.902-913, 1956.
- [10] 原田, 辻, 金子, 金広, 丸山, "直方体モデルに基づく多指ハンドの把握計画", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.762, pp.331-339, 2010.