

# ロボットハンドにおける弾性物体の最適把持

## Optimal grasping of elastic object by robot hand

精密工学専攻 39号 反田 龍一

Ryuichi Sorita

### 1. 序論

近年弁当や総菜などの食品製造業において人手不足が深刻化している。厚生労働省の雇用動向調査<sup>(1)</sup>においては食品業界の欠員率は製造業全体の2倍以上となっている。また、食品業界は人手に頼っている部分が大きく、人手不足の影響を大きく受けている。そこでロボットによる自動化が提案されている。

しかし、機械製品等の製造の自動化と異なり、食品業界では取り扱う素材の違いから様々な技術課題が挙げられる。中でもハンバーグや豆腐のような、柔らかく、強く把持すると変形する物体の把持は大きな問題点の一つである。

関連研究としては、柔軟物体を把持する専用のロボットハンドやグリップの開発<sup>(2)</sup>、などが行われている。しかしこれらの研究においては把持対象ごとに適切なハンドが設計されており、取り扱う商品が短期間で変わる弁当・惣菜などにおいてはコスト面で導入しづらいといった問題点が挙げられる。

そのため、一般的な既存のロボットハンドにおける把持理論の導出が有用である。本研究においては一般的なロボットハンドとして並行グリップ式三本指のロボットハンドを研究対象とした。また、把持対象としては、ハンドで掴む物体として取り扱う可能性が高い、ハンバーグのような弾性物体を対象とする。このような物体が破損することなく、また落とすことのないように把持する理論の構築を目標とする。

### 2. システムの構成

#### 2.1 システム概要

本研究におけるシステム構成の概要を Fig. 1 に示す。

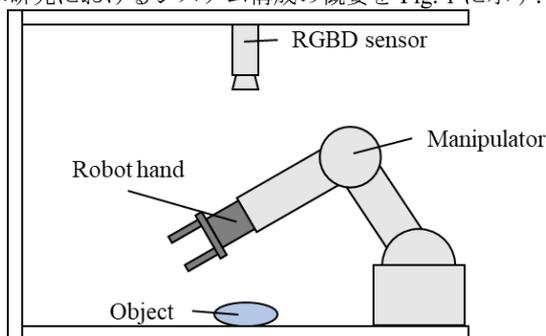


Fig. 1 Picking system

物体を把持するシステムとして、マニピュレータの先端にロボットハンドを取り付ける。また、把持物体の位置を計測するためワークスペースの上部から RGBD センサを下向きに取り付けている。

#### 2.2 ロボットハンドの概要

今回ロボットハンドはダブル技研社の D-Hand Type A5M-M1-PJ を使用した。このハンドは平行グリップ型の3本指ハンドとなっている。アクチュエータは1軸の電動シリンダで、

1自由度の制御が可能である。また、このハンドの特徴的な機能としてはジンバルユニットという機構がある。この機構は、三指にかかる力が均等になるように指が動くというものである。そのため、ハンドは1自由度でしか力を発揮できないが、受動的にすべての指が別々に動くことができる。これにより、指配置が同一円上に無い場合においても無理なく物体を把持することが可能である。

#### 2.3 RGBD センサの概要

RGBD センサは intel 社の RealSense D435i を使用した。RGB 画像より把持物体の位置を計測し、Depth センサにより把持物体の高さ方向の距離を計測する。

#### 2.4 マニピュレータの概要

マニピュレータは Universal robot 社の UR3e を使用した。このマニピュレータは6自由度を有している。この機器は後述の ROS による利用実績が多い機器であり、複数機器を組み合わせる必要がある本研究においてシステム構築が容易であるといった利点がある。

#### 2.5 制御システムの構成

制御システムの構成図を Fig. 2 に示す。マニピュレータ、ロボットハンド、RGBD センサの制御は ROS(Robot Operating System)を用いて行う。ROS とは ubuntu 上で動作するロボット制御用サブシステムである。ROS を用いることで、別々の機器間の通信を簡単に行うことができ、また ROS 対応の機器を利用することで環境構築を比較的簡易に行うことができる。また、ROS のバージョンは Python3 に対応しているため Noetic を利用した。

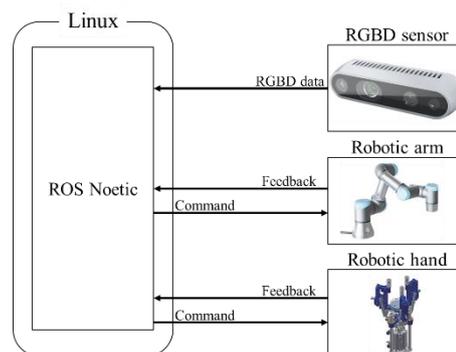


Fig. 2 Control system

### 3. 楕円物体の把持理論

#### 3.1 把持物体の楕円近似

本研究で把持対象とする弾性物体は食品であり、その他の工業製品の部品のように角張った形状のものは少ない。また、その形状は上から見た場合、概ね楕円形状に近い形状が多い。そのため本研究においては把持対象を楕円柱として取り扱う。また、本研究で用いるロボットハンドは平行グリップであるため、上から見た二次元の把持理論を検討する。

### 3.2 最小把持力の導出

長軸半径 $a$  [cm], 短軸半径 $b$  [cm]の楕円物体を考える. この質量を $m = 0.08$  [kg], 静止摩擦係数を $\mu = 0.1$ とする. 把持位置をモデル化したものを Fig. 3 に示す.

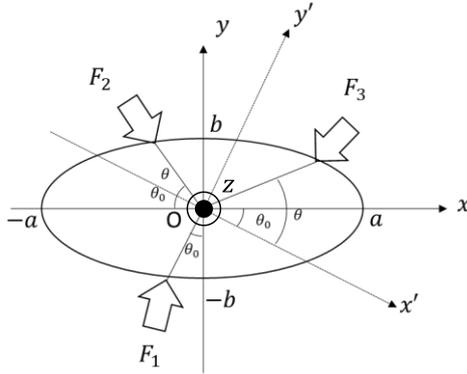


Fig. 3 Grasping position

物体の重心にハンドの中心位置を合わせた把持を考える. ハンド座標系 $O-x'y'z$ から $z$ 軸回りに $\theta_0$  ( $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$ )傾いた楕円物体に, 物体座標系 $O-xyz$ を設定する. ハンドの特性上,  $F_1$ を中心として他の2本の指が左右対称に $\theta$  ( $0 < \theta < \pi/2$ )回転する. 原点と $F_1, F_2, F_3$ となす角度はそれぞれ $\pi/2 - \theta_0, \theta + \theta_0, \theta - \theta_0$ で作用点の座標を極座標で表す. また,  $y$ 軸と $F_1, F_2, F_3$ の成す角度をそれぞれ $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ とし,  $F_1, F_2, F_3$ の紙面手前側の $z$ 軸方向の力をそれぞれ $F_{1z}, F_{2z}, F_{3z}$ とする. 物体の力の釣り合い式より各把持力は次のような関係となる.

$$F_1 = \frac{\sin(\phi_2 + \phi_3)}{\sin(\phi_3 - \phi_1)} F_2 \quad (1)$$

$$F_3 = \frac{\sin(\phi_1 + \phi_2)}{\sin(\phi_3 - \phi_1)} F_2 \quad (2)$$

モーメントのつり合いから,  $\theta = 30^\circ, \theta_0 = 0^\circ, 90^\circ$ が得られる.  $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ$ の2解については $a$ と $b$ の値を入れ替えることにより同じ指配置となるので,  $a$ と $b$ の長短軸半径の縛りを排し軸半径とすることで $\theta_0 = 0$ の場合のみ考えれば良い. また, 変数を減らすため楕円の縦横比を $k = a/b$ として導入する.

$\theta = 30^\circ$ と $\theta_0 = 0^\circ$ における最小把持力を導出する.  $z$ 軸負方向に重力加速度 $g = 9.81$  [m/s<sup>2</sup>]がかかり, 力の釣り合い式と, 摩擦力による滑らない条件式より,  $F_2$ の最小把持力を i)  $0 < k < 1$ の場合と, ii)  $k > 1$ の場合に分けて導出する.  $\theta = \pi/6$ のとき

i)  $0 < k < 1$ の場合

$$F_2 = \begin{cases} \frac{mg}{3\mu} \sqrt{\frac{(k \sin(30^\circ + \theta_0))^2 + (\cos(30^\circ + \theta_0))^2}{(k \cos \theta_0)^2 + (\sin \theta_0)^2}} & (0 < \theta_0 < 30^\circ) \\ \frac{mg}{3\mu} & (30^\circ < \theta_0 < 90^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

ii)  $k > 1$ の場合

$$F_2 = \begin{cases} \frac{mg}{3\mu} \sqrt{\frac{(k \sin(30^\circ + \theta_0))^2 + (\cos(30^\circ + \theta_0))^2}{(k \sin(30^\circ - \theta_0))^2 + (\cos(30^\circ - \theta_0))^2}} & (0 < \theta_0 < 60^\circ) \\ \frac{mg}{3\mu} \sqrt{\frac{(k \sin(30^\circ + \theta_0))^2 + (\cos(30^\circ + \theta_0))^2}{(k \cos \theta_0)^2 + (\sin \theta_0)^2}} & (60^\circ < \theta_0 < 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$\theta_0 = 0$ のとき

i)  $0 < k < 1$ の場合

$$F_2 = \frac{mg \sqrt{(k \sin \theta)^2 + (\cos \theta)^2}}{2k\mu(1 + \sin \theta)} \quad (5)$$

ii)  $k > 1$ の場合

$$F_2 = \frac{mg}{2k\mu(1 + \sin \theta)} \quad (6)$$

### 3.3 最適把持位置の導出

把持力の二乗和の評価関数の $J$ に式(1), (2)を用いると以下のようになる.

$$J = F_2^2 \left( 1 + \left( \frac{\sin(\phi_2 + \phi_3)}{\sin(\phi_3 - \phi_1)} \right)^2 + \left( \frac{\sin(\phi_1 + \phi_2)}{\sin(\phi_3 - \phi_1)} \right)^2 \right) \quad (7)$$

またこれらに式(3)-(6)を代入し,  $\theta, \theta_0$ の最適値を算出した.

Table 1. Optimal grasping position ( $\theta = 30^\circ, 0 < k < 1$ )

$k$	$\theta_0$ [rad]	$J(\theta_0)$
0.1	0.5236	0.6538
0.2	0.5236	0.6191
0.3	1.5708	0.5722
0.4	1.5708	0.5226
0.5	1.5708	0.4762
0.6	1.5708	0.4359
0.7	1.5708	0.4022
0.8	1.5708	0.3744
0.9	1.5708	0.3518
1.0	0.4000	0.3333

Table 2. Optimal grasping position ( $\theta = 30^\circ, 1 < k$ )

$k$	$\theta_0$ [rad]	$J(\theta_0)$
1	1.1707	0.3333
2	1.0473	0.4762
3	1.0473	0.5556
4	1.0473	0.5966
5	1.0472	0.6191
6	1.0472	0.6326
7	1.0473	0.6411
8	1.0473	0.6469
9	1.0473	0.6509
10	1.0472	0.6538

Table 3. Optimal grasping position ( $\theta_0 = 0^\circ, 0 < k < 1$ )

$k$	$\theta$ [rad]	$J(\theta)$
0.1	1.5707	0.3750
0.2	1.5707	0.3750
0.3	1.5707	0.3750
0.4	1.5707	0.3750
0.5	1.5707	0.3750
0.6	1.5707	0.3750
0.7	1.5707	0.3750
0.8	1.5707	0.3750
0.9	0.7744	0.3633
1.0	0.5236	0.3333

Table 4. Optimal grasping position ( $\theta_0 = 0^\circ, 1 < k$ )

$k$	$\theta$ [rad]	$J(\theta)$
1	0.5236	0.3333
2	1.5707	0.3750
3	1.5707	0.3750
4	1.5707	0.3750
5	1.5707	0.3750
6	1.5707	0.3750
7	1.5707	0.3750
8	1.5707	0.3750
9	1.5707	0.3750
10	1.5707	0.3750

$\theta_0 = 0^\circ$ のとき, 評価関数の最小値における平均値は $J = 22.81$  [N<sup>2</sup>]となる. また,  $\theta = 30^\circ$ のときの評価関数の最小値の平均値は $J = 32.48$  [N<sup>2</sup>]である. よって $\theta_0 = 0^\circ$ つまり指の1本が楕円物体の軸上にあるほうが最適な把持位置である.

## 4. ロボットハンドの制御理論

### 4.1 ロボットハンドの中心座標

本研究で用いるロボットハンドは、指の配置をサーボモータにより 1 自由度で動かすことが可能である。Fig. 4 にハンドを先端から見た図面を示す。図中に示す指 2,3 は左右対称に角度を  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  の範囲で動かすことが可能である。回転軸がハンドの中心からずれているため、角度によりハンドの中心は上下に移動する。そのハンドの移動量  $d$  は以下のように表される。

$$d = 20 \sin(90^\circ - \theta) - 10 \quad (8)$$

このためマニピュレータの手先位置の  $y$  軸方向に補正を行う必要がある。

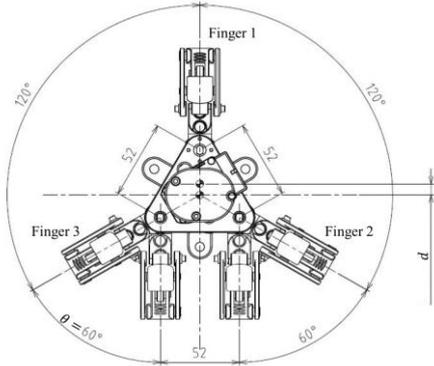


Fig. 4 Finger angle

### 4.2 指先位置とシリンダの移動量の導出

最適把持を行うため、指の位置からシリンダの移動量を導出する。ハンドの持つジンバルユニットにより、各指が発揮する力は等しくなる。そのため、把持動作においては各指が把持物体と接触することにより拘束されるため、それぞれ別々の移動量を持つことができる。目的の移動量を得るためのシリンダの移動量を導出するにあたり、まず各指のスライダ移動量を求め、ジンバルユニットの構造からシリンダの移動量を求める。

#### 4.2.1 各指のスライダ移動量

各指のリンク構造は Fig. 5 に示すようにモデル化できる。モデルより指先の横方向の移動量  $x_i$  とスライダの移動量  $y_i$  においては以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{cases} x_i = h_f \cos \theta_{fi} \\ l^2 = (w_f + p_y \cos \theta_{fi} - p_x \sin \theta_{fi})^2 \\ \quad + (y_i + p_y \sin \theta_{fi} + p_x \cos \theta_{fi})^2 \end{cases} \quad (9)$$

以上より  $x_i$  が定まれば  $\theta_{fi}$  が一意に定まるため、 $y_i$  が導出可能である。

#### 4.2.2 ジンバルユニットによるシリンダの移動量

前項で各指のスライダ移動量について導出を行った。前項で各指のスライダとして取り扱った点は、実際はジンバルユニットによって、ハンドのアクチュエータであるシリンダへと接続されている。ジンバルユニットをモデル化した図を Fig. 6 に示す。ジンバルユニットはシリンダを軸として回転することにより、他の指が先に把持物体に接触した際にも、残りのすべての指が接触するまで動くことができる。実際にはジンバルユニットと各指へのリンクのジョイント部分は三次元的に動く。しかし、ジンバルユニットの傾きは比較的小さいため、 $y$  軸方向以外の動きも小さい。そのため  $y$  軸方向以外

の動き無視し簡略化を行った。よってシリンダの移動量  $Y$  は  $y_i$  を用いて以下のように表される。

$$Y = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 y_i \quad (10)$$

以上によってロボットハンドの指先位置から、ハンドのアクチュエータであるシリンダを制御することができる。

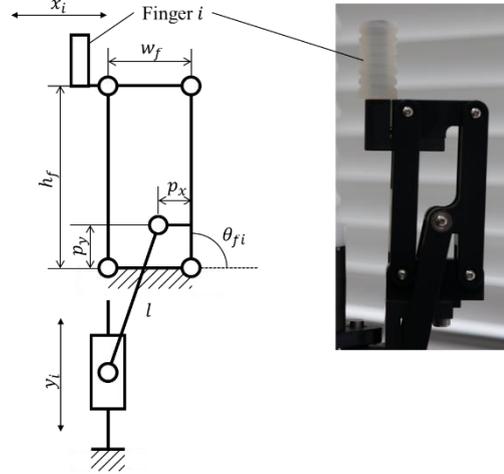


Fig. 5 Finger link

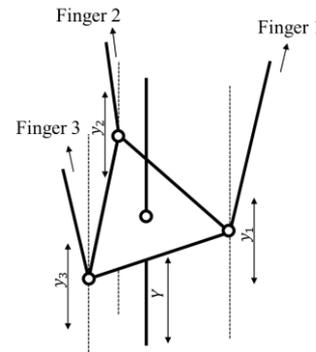


Fig. 6 Gimbal unit

## 5. シミュレータの製作

弾性物体把持において一番の問題となるのが、物体の変形である。一般的なロボットハンドにおいては各指に力センサがついていないハンドが多く存在している。本研究に用いているハンドも力センサが無いため直接的な力制御は不可能である。そのため、前もってシミュレーションによって変形を計算し、各指の移動量を導出し、電動シリンダの移動量により必要な把持力が発揮されているかを推定する必要がある。

本研究においては二次元の有限要素法を用いて簡易に変形を求めた。また、後に把持システム内に組み込み利用することを考え、メッシュャーと FEM 計算プログラムを自作した。プログラムはすべて Python を用いて実装した。

### 5.1 メッシュャー

今回実装したメッシュャーは 3 節点 1 次要素に分割するものである。節点は楕円内に年輪状に配置した同焦点楕円上に、楕円の媒介変数の角度を等分した位置に配置した。また、節点を三角要素に分割するのは SciPy の Delaunay クラスによってドロネー三角形分割を行った。実際に分割した例を Fig. 7 に示す。

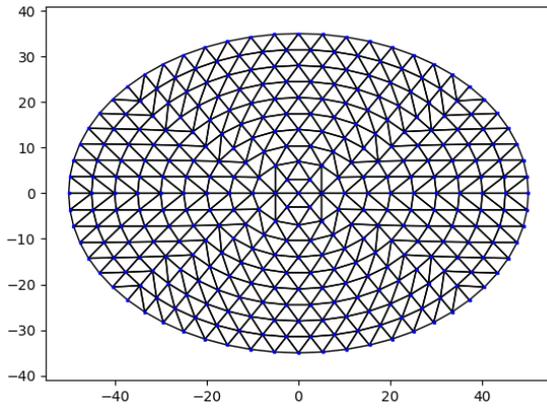


Fig. 7 Mesh for ellipse

## 5.2 FEM 計算プログラム

FEM の計算プログラムにおいては一般的な二次元の三角 1 次要素のプログラムを構築した。

### 5.2.1 平面状態

本研究においては把持対象をハンバーグのような楕円板と仮定し、平面応力状態で計算を行った。これは奥行方向の応力を 0 とみなして計算を行うため、厚みの薄い板材などに向いている。

### 5.2.2 強制変位処理

全剛性行列から変位を求解する前に既知変位と未知外力の要素を入れ替える処理を行っているため、0 でない強制変位も処理可能である。このため外力から変位の計算だけでなく、変位から外力への計算も可能である。

### 5.2.3 疎行列処理

分割数を増やすと計算処理に時間がかかってしまう。また前項の処理を行うに当たり全剛性行列の中に 0 の要素が増える。入れ替え処理の少ない拘束条件の場合でも合成行列自体に 0 の要素が多いため疎行列処理が有効である。疎行列処理とは 0 の多い行列(疎行列)において 0 以外の要素だけを記録し、計算することにより処理速度を上げることができる。三角要素においては 1 要素あたりの自由度も小さいためそこまで時間短縮はできなかったが、四角要素への対応の際にはメリットがあると思われる。

## 5.3 実験

実際の数値を用いて電動シリンダの変位まで計算を行った。

## 6. シミュレーションの検証

### 6.1 シミュレーション

実際の機器で取りうる数値を用いて電動シリンダの変位まで計算を行った。パラメータは Table 5 のように設定した。

Table 5 Experimental parameters

Semi-major axis [mm]	50
Semi-minor axis [mm]	45
Young's modulus [MPa]	10
Poisson's ratio	0.2

以上の数値より、最適把持位置は  $\theta = 46^\circ$ 、また把持力は  $F_i = 5$  [N] である。以上を FEM 計算にかけた結果を Fig. 8, Table 6 に示す。メッシュの分割数は 21600 とした。

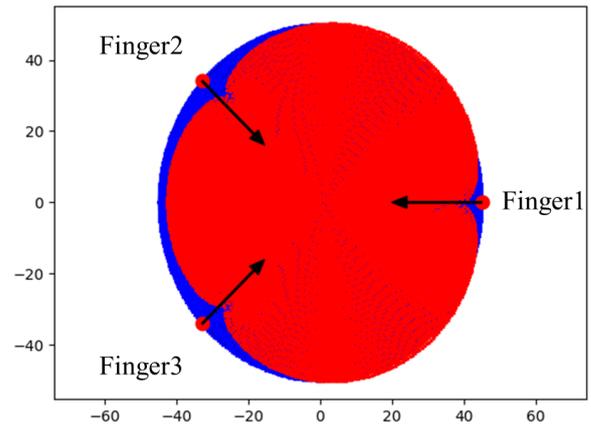


Fig. 8 Deformation simulation

Table 6 Displacement of fingers

Finger 1 [mm]	9.8
Finger 2 [mm]	13.0
Finger 3 [mm]	13.3

式(9)より  $y_i$  を求めると

$$y_1 = 82.1, y_2 = 82.7, y_3 = 82.8 \text{ [mm]} \quad (11)$$

となり、式(10)よりシリンダの移動量  $Y$  は

$$Y = 82.5 \text{ [mm]} \quad (12)$$

と導出される。

## 6.2 考察

把持物体の凹み量としては概ね先行研究の実験データと同じスケールの結果が得られた。しかし、凹み量がやや大きく、把持位置で極端な凹み方をするとといった問題点が挙げられる。これは、今回の検証においては指の面積を無視しており、1 節点に力がかかっているためだと考えられる。また、均等に配置した節点の三角要素による FEM のため、精度が落ちてしまう。これについては、四角要素を用いたり、局部的に節点密度を高めたりするなどの改良が考えられる。実機においては位置誤差などが考えられるが、最少把持力より多少強く把持することにより、変形に誤差が丸め込まれ、把持成功可能性は高まると考えられる。今回の検証では実際よりも凹み量が多く算出されているため、実機においては最少把持力よりも大きな力が発揮される。そのため、把持成功という面ではこのシステムの実現性は高いといえるだろう。

## 7. 結論

本研究では楕円形状の弾性物体の把持理論を提案した。ハンドなどにどのような指令値を送ればよいかを導出することができた。現時点ではシミュレーションによる検証しか行えておらず、導出した把持理論が実機でも実用的なものであるかの検証が必要である。また、ヤング率やポアソン比などの物性データは食品には殆どないため、その都度計測するか把持訓練から学習するようなシステムの構築が必要である。

## 参考文献

- (1) <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/9-23-1.html>
- (2) 堀江一生, 藤本健太, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 漏斗構造とフィルタを有する真空吸着グリッパによる柔軟物把持の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2017) 2A1-N01