

バイディングハンドにおける把持力のモデリング

○岡田 育実 (立命館大学), 平井 慎一 (立命館大学)

Modeling gripping force in binding hand

○Ikumi OKADA (Ritsumeikan University) and Shinichi HIRAI (Ritsumeikan University)

Abstract: This research aims to develop a robot hand with a flexible thread for binding. In this paper, we report the theoretical model of binding. Showing the simulation of the binding hand consisting of three fingers.

1. 緒言

現在, 日本における弁当の製造量は1日当たり数百万食以上である[1]. このような弁当の詰め合わせをはじめとする食品ハンドリング作業の多くは現状, 人の手に頼る状況である. しかし少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少や人件費の高騰を考慮すれば, 食品ハンドリングは自動化が求められる分野のひとつであると言える. 食品は大きさや形状のばらつきが激しく, 柔軟物体も多く含まれる. しかし, 広く普及しているロボットアームとエンドエフェクタは一定寸法の剛体を扱うことに長けており, 食品ハンドリングは困難な作業であると考えられる. 従来のロボットハンドでは食品への対応が難しいため, 把持物体のばらつきや制御誤差を許容できるロボットハンドによるハンドリング技術が求められている.

以上より, 本研究は柔軟な手先を持ちバイディングを用いたロボットハンドの開発を目的とする. 本稿では, 一般化したモデルにおける把持力の解析解を報告する. また, 一例として3指のバイディングハンドのシミュレーションを行う.

2. バイディング

本章では, バイディングという拘束手法とバイディングを用いたロボットハンドについて説明する.

2.1 原理と特徴

バイディングとは, フォースクロージャ (force closure) とケーシング (caging) の特徴を生かすような物体の把持手法である[2]. フォースクロージャとは, 図1(a)に示すように, 把持物体との間に滑りが発生しないことを条件とし, ハンドリング物体に作用する任意の外力に対して力とモーメントの平衡式が成立する状態を満たす物体の拘束方法である[3]. 実際にはハンドリング操作時に外力と接触面での摩擦力が発生するため, 把持する指の位置や把持力が把持物体にどの程度影響するかに関しては事前に分析する必要がある. また, ケー

ージングとは図1(b)に示すように, 対象物とハンドの接触点が生ずる閉鎖領域に対象物を閉じ込める幾何学的な物体拘束手法である[4]. ケーシングは把持物体の自由度を完全に奪う必要が無く, 接点の位置制御のみで物体拘束が可能である. 位置制御のみでの物体拘束が可能なこと力制御が不要である.

本研究で扱うバイディングのモデルを, 図2に示す. 本モデルでは, 把持物体の周囲に連続した弾性糸を設置し, その弾性糸で把持物体を縛り付ける手法である. 把持物体にかかる応力を小さくすることで, 必要以上の変形をさせず, 確実性の高い把持操作を実現することを目的とする. また, 弾性糸と把持物体の接触面が増加させることによって, 対象物との接触部にかかる圧力を分散させることができる.

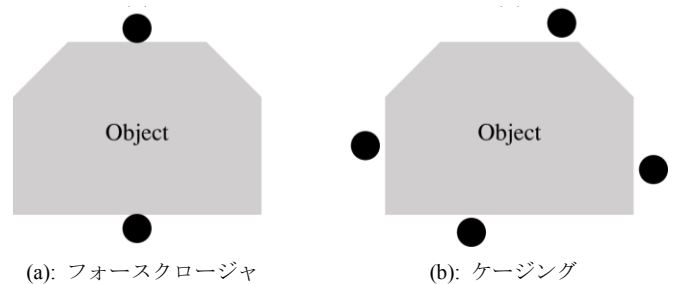


図1: 拘束方法

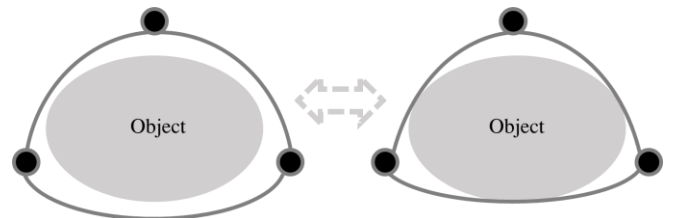


図2: バイディングの把持モデル

2.2 実機システム

製作したロボットハンドの概観を図3に示す. 実機の最大時の大きさは底面直径 201 mm, 高さ 183 mm であり, 重量は 468 g である. 把持可能範囲は最小で直径 28 mm, 最大で直径 81 mm である. 実機は, 剛体物

から成る 3 本の棒の先端に、把持物体をバイディングするための弾性体から成る紐状の把持部分（以降バイディング糸と呼ぶ）が張られている。また、もう一方の先端にはラックギアが固定され、中心にある DC モータを回転させることで、図 4(a)のようにラックギアに動力が伝わり剛体棒を放射状に広狭する。また、剛体棒の間隔を狭めるとバイディング糸がたるんでしまうため、図 4(b), (c)のように DC モータからラックギアに動力を伝えるギアにバイディング糸の巻取りを行うプーリを取り付けた。これにより、1つのアクチュエータで手先の開閉と糸のたるみ防止の巻取りを同時に行うことができる。巻取りプーリの直径は 59.48mm とした。これは、実機底面のバイディング糸の張力が常に自然長となるように計算している。そして、3 指の開閉によってバイディング糸を把持物体の外形に沿って接触させながら把持物体の把持を行う。

先行研究[2]では、2つのモータを用いてハンドの開閉と糸の巻取りをそれぞれ行っていた。しかし、制御を簡易化させることから、本研究では 1つのモータで 2つの動作を行った。

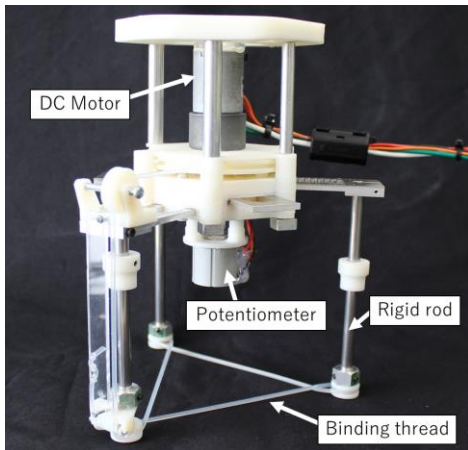


図 3: 実機の概観

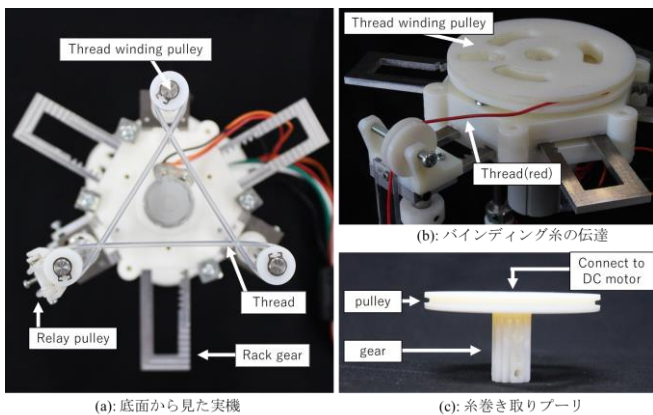


図 4: 実機構成

3. 近似モデルによる把持力シミュレーション

本章ではバイディング糸が把持物体に加える力をバイディング糸の近似モデルから求める。図 5 の左図は、実機を底面から見たバイディング糸の形状である。また、図 5 の右図は、実機を図形に置き換えて考えた際のモデル図である。剛体棒は図 5 中の上部から時計周りに $Fing_1$, $Fing_2$, $Fing_3$ とし、バイディング糸は剛体棒の番号を添え字として付け $b_{1,2}$, $b_{2,3}$, $b_{3,1}$ と呼ぶ。

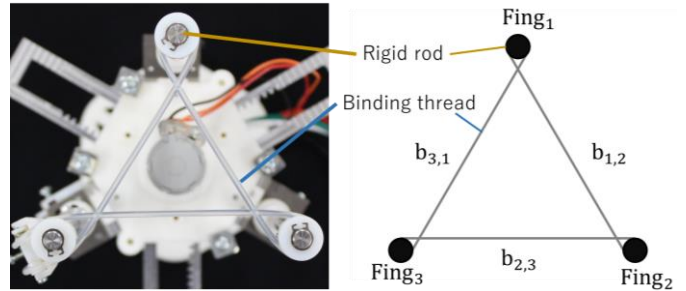


図 5: 実機とモデル図の対応

3.1 把持力モデル

近似モデルを求めるにあたり、以下の内容を仮定する。

- ・把持物体は円柱状剛体で、側面に傾斜はない。
 - ・把持物体はバイディングハンドの把持領域の中心にあるとする。つまりバイディング糸から把持物体にかかる力は均一である。
 - ・バイディング糸の変位—張力関係は既知である。
 - ・剛体指を狭めてもバイディング糸はたるまない。
- また、把持物体とバイディング糸の接触関係は以下の 3 通りに分けることができる。

- 把持物体とバイディング糸が接触しない。
- 把持物体とバイディング糸が点で接触する。
- 把持物体とバイディング糸が線で接触する。

対応するモデル図を図 6 に示す。本モデルは、バイディング糸が把持物体と点接触する状態(B)を基準として、状態(C)の時に把持物体にかかる把持力について考える。

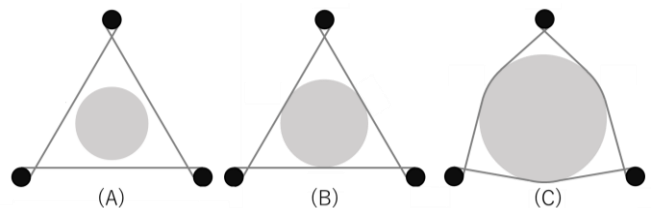


図 6: 把持物体とバイディング糸の接触関係

把持力を一般化するため、剛体棒の本数を n 本とする (以下 n 指と表現する). それにより、ハンド底面から見たバイディング糸の形状は n 角形となる. また、図 7 のように、剛体棒は図中の上部から時計周りに $\text{Fing}_1, \text{Fing}_2, \dots, \text{Fing}_n$ とし、剛体棒間に張られたバイディング糸は剛体棒の番号を添え字として付け $b_{1,2}, b_{2,3}, \dots, b_{n-1,n}, b_{n,1}$ と呼ぶ.

図 8 に $b_{n,n+1}$ が状態(B)から状態(C)になった際の幾何学モデルを示す. このとき、 O は把持物体の中心、 f_i は状態(B)時に Fing_i のバイディング糸が交差する点、 f'_i はハンドを任意量閉じた位置、すなわち f_i が状態(C)になった際の任意の点 ($Of'_i \leq Of_i$)、 A_i は状態(B)時に把持物体とバイディング糸が接する点、 C_i は状態(C)時に把持物体とバイディング糸が接する点である. また、把持物体の半径は r 、 $f_i f'_i$ の長さを d とする.

バイディング糸の法線方向の接触力を $F_{i,i+1}$ とすると、力の関係式は以下ようになる.

$$\begin{aligned} F_{all} &= n \cdot F_{i,i+1} \\ F_{i,i+1} &= 2(T_{i,i+1} \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

F_{all} はバイディング糸が把持物体に加わる力の総和、 $F_{i,i+1}$ はバイディング糸 $b_{i,i+1}$ が把持物体に加わる力、 $T_{i,i+1}$ はバイディング糸 $b_{i,i+1}$ が把持物体と接触した際に伸びることによって発生する張力である. また、 θ は 図 8 に示す $\angle f_i A_i C_i$ である. 図 9 に 3 指の場合に把持物体に加わる力を示した. なお、 $F_{i,i+1}$ は、式(1)に示す $T_{i,i+1}$ と $\sin \theta$ を導出することで定まる.

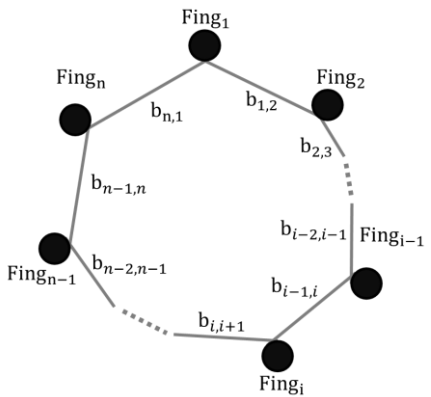


図 7: n 指の場合の剛体棒とバイディング糸の関係

張力 $T_{i,i+1}$ は、実測したバイディング糸の変位と張力の近似式に照らし合わせて求める. 実験と近似式の詳細は 3.2 で述べる. また、仮定よりバイディング糸と把持物体側面のどの接触点でも力の大きさは等しい. そのため、すべての剛体棒間のバイディング糸張力は等しいのですべて T と置き換える.

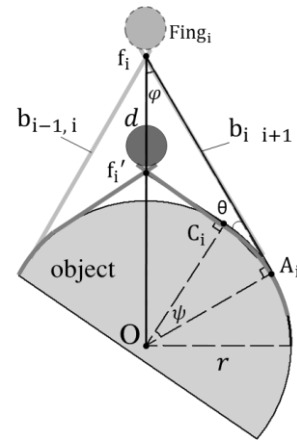


図 8: シミュレーションに用いる幾何学モデル

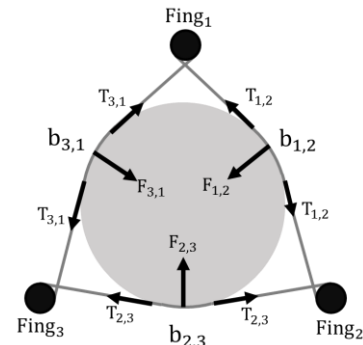


図 9: バイディング糸から把持物体に加わる力 (3 指の場合)

ハンド底面から見たバイディング糸の形状が n 角形であることから、

$$\varphi = \frac{\pi(n-2)}{2n} \quad (2)$$

が成り立つ. $\triangle f'_i O C_i$ において、 $\angle f_i O A_i$ より $\angle C_i O f'_i$ は $\pi/2 - \varphi - \psi$ 、 $\angle C_i f'_i O$ は $\varphi + \psi$ である. $\angle C_i f'_i O$ は $\varphi + \theta$ でもあるため、 $\psi = \theta$ となる. 次に、 $\triangle f'_i O C_i$ の 3 辺の長さは、

$$\begin{aligned} OC_i &= r \\ Of'_i &= \frac{r}{\sin \varphi} - d \end{aligned}$$

$$C_i f'_i = \sqrt{d^2 - r^2 + \frac{r}{\sin \varphi} (r - 2d \sin \varphi)} \quad (3)$$

と表される. 図 8 の $\angle O A_i f_i$ より、 $\sin(\varphi + \theta)$ 、 $\cos(\varphi + \theta)$ を求めると、

$$\sin(\varphi + \theta) = \frac{r}{\frac{r}{\sin \varphi} - d}$$

$$\cos(\varphi + \theta) = \frac{\sqrt{d^2 - r^2 + \frac{r}{\sin \varphi} (r - 2d \sin \varphi)}}{\frac{r}{\sin \varphi} - d} \quad (4)$$

を得る。上式を加法定理で展開すると、

$$\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi = \frac{r}{\frac{r}{\sin \varphi} - d}$$

$$\cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi = \frac{\alpha}{\frac{r}{\sin \varphi} - d}$$

$$\alpha = \sqrt{d^2 - r^2 + \frac{r}{\sin \varphi} (r - 2d \sin \varphi)} \quad (5)$$

を得る。式(5)を連立方程式として解くことで、

$$\sin \theta = \frac{r \cdot \cos \varphi - \alpha \cdot \sin \varphi}{\frac{r}{\sin \varphi} - d} \quad (6)$$

が得られ、把持力 F_{all} を結果として、

$$F_{all} = 2nT \frac{r \cdot \cos \varphi - \alpha \cdot \sin \varphi}{\frac{r}{\sin \varphi} - d} \quad (7)$$

と表すことができる。

3.2 張力の実測

前節のモデリングでは、バイディング糸の変位—張力関係が必要である。そこで、実機に用いるシリコンゴムひもの変位—張力関係を計測した。実験のシステム構成を図 10 に示す。シリコンゴムひもの右端をフォースゲージ、左端をリニアアクチュエータにそれぞれ固定し、リニアアクチュエータを動かした時にフォースゲージが引張られる力を計測した。なお、シリコンゴムひもは直径 2mm、初期長は実機にバイディング糸を取り付けた際、最低限必要な 335 mm、リニアアクチュエータは糸の伸び率が 2 倍となるように 335 mm 動かした。

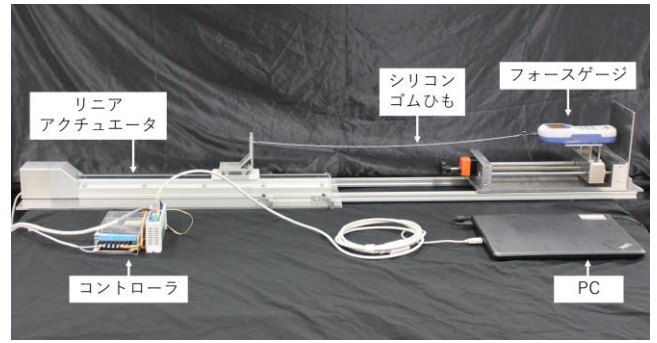


図 10: 変位—張力関係計測のシステム構成

計測の結果を図 11 に示す。破線部は計測結果を 4 次式の近似で表したものである。この近似式を 3.3 節の数値シミュレーションに用いる。

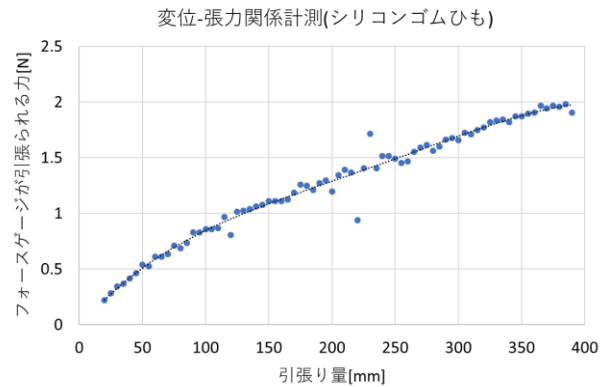


図 11: 変位—張力関係計測の結果

3.3 シミュレーション

導出した 3.1 節の近似モデルを用いてバイディングハンドの把持力シミュレーションを実施した。バイディング糸の初期接触状態を図 6 の状態(B)とし、図 7 の f_1' が把持物体に接触するまで剛体棒を把持物体中心方向に動かし、3 指の場合についてシミュレーションを行った。式(7)内における定数と変数は、以下のように定めた。

$$r = 33.25[\text{mm}], \quad 0 \leq d \leq \frac{33.25}{\sin \varphi} - 33.25[\text{mm}]$$

シミュレーションの結果を図 12 に示す。引張り量は 0~400mm までを取り、計測値を 4 次式で近似した。シミュレーションで実測値の範囲を超えると大きく値が外れるため、張力の近似式は実測した範囲内で用いる。実際の実機で使用する糸の変位量の範囲における張力を正確に測ることでシミュレーションの精度向上に繋がると考えられる。

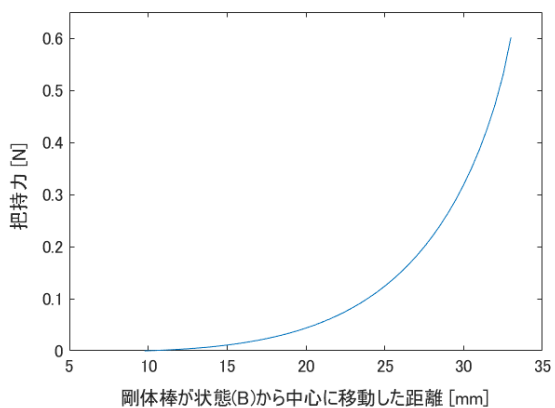


図 12: シミュレーション結果

4. 結言

本稿では、バイディングハンドにおける把持力の解析を行った。初めに把持物体とバイディングハンドの状態を仮定し、把持物体とバイディング系の接触状態から、把持モデルを一般化した。バイディング系の張力と把持力を力のつり合いから導出した。幾何学的関係から把持力の式を解き、バイディングハンドの指の位置と把持力の関係を求めた。また、関係式を用いて、3指の場合のシミュレーションを行った。実機のバイディング系として用いるシリコンゴムひもの変位-張力関係を計測した。そして計測結果から3指指位置と把持力をシミュレーションした。

今後は、このシミュレーション結果を実験的に検証していく。

参考文献

- [1]“日本のコンビニ弁当の行方と環境への取り組み,” 慶應義塾大学 細田衛士研究会, 事前レポート, 2011.
- [2]岩政恒史:”Bindingに基づく柔軟紐ハンドによる把持操作,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, "3P1-S02(1)" - "3P1-S02 (4)", 2014 年.
- [3]平井慎一, 若松栄史: “ハンドリング工学,” コロナ社, 2005.
- [4]E.Rimon and A.Blake: “Caging planar bodies by one-parameter two-fingered gripping systems,” Int. J. of Robotics Research, vol.18, no.3, pp.299-318, 1999.