

# 物体操作のためのタクタイルセンサを用いた 柔らかい指先のモデリング

朴貴浩 金丙鎬 平井慎一

## Modeling of a Soft Fingertip with Tactile Sensors for Object Manipulations

\*Kwi-Ho Park, Byoung-Ho Kim, and Shinichi Hirai

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.,  
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-0058, Japan

**Abstract**— In this paper, a simple modeling of a soft fingertip based on geometrical analysis is proposed. First, we introduce a virtual spring system of the soft fingertip with a hemisphere shape. And then, we describe the force distribution formed on the contact plane between the object and the soft fingertip. Finally, the total force relationship according to the displacement of the fingertip is verified by experiment, where a tactile sensor is used to measure the contact force.

**Key Words:** modeling of a soft fingertip, force distribution, tactile sensor

### 1. はじめに

2指または多指ハンドによる物体の把持と操作に関する研究や、いわゆる触覚センサの研究は従来より数多く行われてきた<sup>1)~6)</sup>。また、ロボットの指を仮想ばねと仮定した研究<sup>8)</sup>や人間の指をゴム人指に近似しモデリングを行う研究<sup>7)</sup>も行われている。前川ら<sup>1)6)</sup>は、半球面光導波路を用いて触覚センサの開発を行っている。また、そこで開発された触覚センサを搭載した指先を持つ2指ハンドによる把持物体の操り制御を実現している。しかし、操り動作の運動学では、各指先を剛体として考慮し把持物体と指先間においては、点接触を仮定している。人間の指は自在変形可能な柔らかい性質を有するため、柔らかい物体、すなわち、弾性を持つ材質でできた指先のモデルが必須である。

本論文では、物体を把持することにより発生する物体接触面に加わる力をモデル化し、その反作用により現れる指先側に加わる力が、柔軟指に沿って半球下部平面にどのように伝達されるのかを、理論的かつ幾何学的に導く。

さらに、半球型指先の下部にはタクタイルセンサを敷き、現れる圧力を考察し実験を行う。ここで得られた実験結果により、本研究で得られた柔らかい指先のモデルと比較する。

以上のように本報告では、半球型の指先搭載可能な弾性体の指先モデルを導出し、この半球型弾性体に沿った力の伝わり方の一手法を提案する。

### 2. 接触における指先座標の一般化

把持物体と指先との初期接触点（接触開始点）は理論上半球表面上に無数に存在し、3次元方向接触を構成する。3次元方向接触とは、Fig.1(a),(b)のような、半球面上の任意の点における接触で、外力の向きが接触面の法線方向と一致する接触と定義する。3次元方向接触の解析をするには、未知数が増え幾何学的意味合

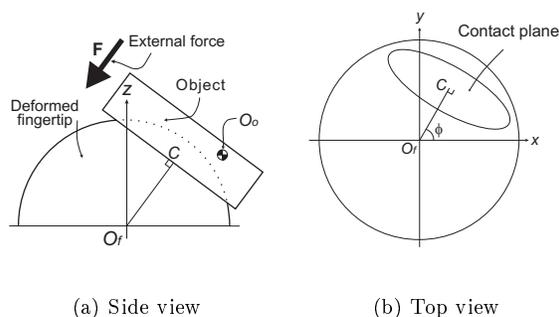


Fig.1 Three dimensional contact

いも分かりにくくなるため、まず、最も簡単な1次元方向接触に関するモデルを構築し、順を追って2次元、3次元へとモデルを拡張する。ここで、モデルの解析

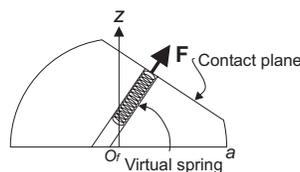


Fig.2 Virtual spring

を簡単かつ、注意深く行うために、本研究で考慮すべき仮定を設定する。

1. 接触物体は剛体であり、接触面は平面である。
2. Fig.2のように、微小面積あたりの指先による弾性力  $F$  はその微小面積における円筒仮想ばねからのみ受け、それ以外の部位からの弾性力は無視する。

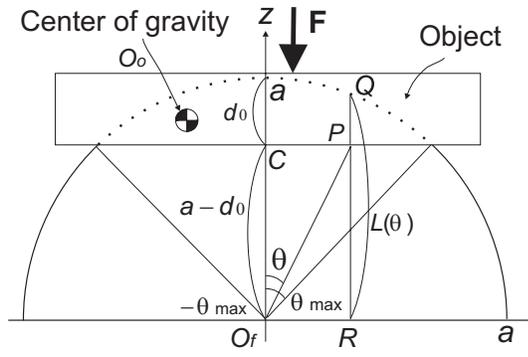


Fig.3 One dimensional contact

## 2.1 1次元方向接触

1次元方向接触とは Fig.3 のように、物体接触面の法線ベクトルが  $z$  軸に等しくその法線方向に外力  $F$  が加わる接触と定義する。まず、 $(\theta, \phi)$  は極座標系における接触面上の任意の点の角度、 $a$  は半球型指先の半径、 $d_0$  は指先の最大変位置量、 $\theta_{max}$  は接触面における最大角と置く。

## 2.2 幾何学的考察

Fig.3 のように、 $\Sigma_{O_f}$  座標系において原点  $O_f$  を通る法線が接触面と交わる点を  $C$ 、接触面上の任意の点を  $P$  と置くと点  $P$  の位置ベクトルは、以下のようになる。

$$O_f \vec{P} = O_f \vec{C} + C \vec{P} = \begin{bmatrix} (a-d_0) \tan \theta \cos \phi \\ (a-d_0) \tan \theta \sin \phi \\ a-d_0 \end{bmatrix}$$

直線  $PQ$  はパラメータ  $t$  を用いて、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a-d_0) \tan \theta \cos \phi \\ (a-d_0) \tan \theta \sin \phi \\ a-d_0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表すことができる。指の表面は  $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$  で与えられるから、直線  $PQ$  と球との交点  $Q$  は、

$$O_f \vec{Q} = \begin{bmatrix} (a-d_0) \tan \theta \cos \phi \\ (a-d_0) \tan \theta \sin \phi \\ \sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

である。したがってベクトル  $\vec{PQ}$  は、

$$\begin{aligned} \vec{PQ} &= O_f \vec{Q} - O_f \vec{P} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta} - (a-d_0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、大きさ  $|\vec{PQ}|$  は接触面上の任意の点  $P$  における半球型指先の変位置量（縮み量）である。

次に、fig.3 における最大角  $\theta_{max}$  を求める。 $\theta_{max}$  は、 $|\vec{PQ}|=0$  のときの角度  $\theta$  に相当するので (3) 式より、

$$\tan^2 \theta_{max} = \frac{a^2 - (a-d_0)^2}{(a-d_0)^2} \quad (4)$$

が得られる。

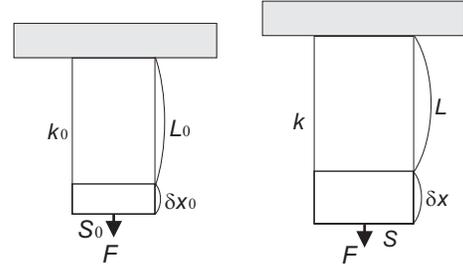
## 3. 接触における静力学的解析

本研究では、半球型の柔軟な指先を仮想ばねと仮定し、物体と指先とで及ぼしあう力関係を定式化する。

### 3.1 微小面積要素における仮想ばね

Fig.4 に示すふたつのばねを比較する。ばねの基準長さを  $L_0$ 、基準面積を  $S_0$ 、そのときのばね係数を  $k_0$  とし基準ばね係数と呼ぶ。このとき長さが  $L$ 、面積  $S$  のばね係数  $k$  は次のようになる。

$$k = \frac{S}{S_0} \frac{L_0}{L} k_0 [N/m] \quad (5)$$

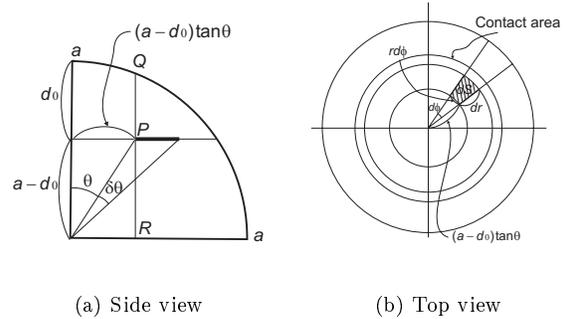


(a) Unit spring

(b) Spring

Fig.4 Spring definition

次に、物体と指先との接触面の微小面積要素における仮想ばね係数を求める。Fig.5(b) のように、接触面において微小半径を  $dr$ 、微小回転角を  $d\phi$ 、微小面積要素を  $dS$  とすると Fig.5(a) より以下の式が得られる。



(a) Side view

(b) Top view

Fig.5 Infinitesimal area on the contact plane

$$\begin{aligned} dS &= r dr d\phi \\ r &= (a-d_0) \tan \theta \\ dr &= (a-d_0) \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta \\ dS &= (a-d_0)^2 \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta d\phi \end{aligned} \quad (6)$$

線分  $QR$  の長さ  $L(\theta)$  は Fig.3 と (3) 式より、

$$L(\theta) = \sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta} \quad (7)$$

のように得られる．微小面積要素  $dS$  における仮想ばね係数  $dk(\theta)$  は (5)(6)(7) 式より，以下のように得られる．

$$\begin{aligned} dk(\theta) &= \frac{dS}{S_0} \frac{L_0}{L(\theta)} k_0 \\ &= \frac{L_0 k_0}{S_0} \frac{dS}{\sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta}} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.2 接触物体に加わる力

Fig.6(a) のように，線分 PQ が縮むことによって現れる微小面積あたりの仮想ばねの弾性力を求める．微小面積要素  $dS$  に作用する力を  $d\mathbf{F} = [dF_x(\theta) \ dF_y(\theta) \ dF_z(\theta)]^T$  とし微小面積の変位  $P\vec{Q}$  と力  $d\mathbf{F}$  との関係性を剛性行列  $K$  を用いて定式化する．すなわち，

$$d\mathbf{F} = K P\vec{Q} \quad (9)$$

と定義する．本研究では，1次元方向接触を想定しているため Fig.6(a) の微小面積  $dS$  における剛性行列  $K$  を，以下のように定義し  $d\mathbf{F}$  を求める．この  $d\mathbf{F}$  には  $z$  軸成分のみ存在し以下ようになる．

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dk(\theta) \end{bmatrix},$$

$$dF_z(\theta) = \frac{L_0 k_0}{S_0} \left( 1 - \frac{a-d_0}{\sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta}} \right) dS. \quad (10)$$

さらに (10) 式を  $\theta$  の関数として表すと，次式になる．

$$\begin{aligned} dF_z(\theta) &= \frac{L_0(a-d_0)^2 k_0}{S_0} \\ &\times \left[ \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} - \frac{(a-d_0) \sin \theta}{\cos^3 \sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta}} \right] d\theta d\phi \end{aligned} \quad (11)$$

最後に，Fig.6(b) のように指先と物体との接触面全体に現れる仮想ばねによる弾性力は，(11) 式を接触領域内の  $\theta, \phi$  について積分することにより次のように得られる．

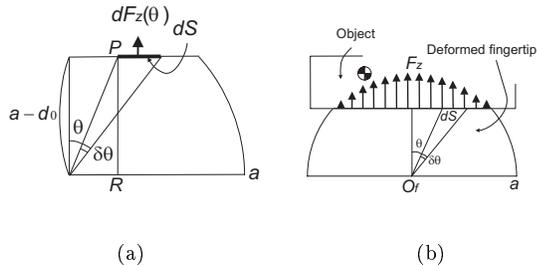


Fig.6 Elastic force : (a) Force on the infinitesimal area, (b) Total force on the contact area

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{L_0(a-d_0)^2 k_e}{S_0} \times \\ &\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} \left[ \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} - \frac{(a-d_0) \sin \theta}{\cos^3 \sqrt{a^2 - (a-d_0)^2 \tan^2 \theta}} \right] d\theta d\phi \\ &= \frac{L_0(a-d_0)^2 k_e}{S_0} \left[ \pi \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_{max}} - 1 \right) - \frac{2\pi a}{a-d_0} (1 - \sin \alpha_1) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ここで，

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left( \frac{a-d_0}{a} \tan \theta_{max} \right).$$

さらに，(12) 式は (4) 式を使って簡単化でき，以下の式になる．

$$F_z = \frac{\pi L_0 k_0}{S_0} d_0^2 \quad (13)$$

(13) 式において  $\pi L_0 k_0 / S_0$  は定数であるから，指先の全変形部から接触物体に加わる弾性力  $F_z$  は，変形した指先の最大変位量  $d_0$  の 2 乗に比例することを意味する．

## 4. タクタイルセンサを用いた実験

前章で導出した指先に現れる弾性力  $F_z$  の正当性を検証する．

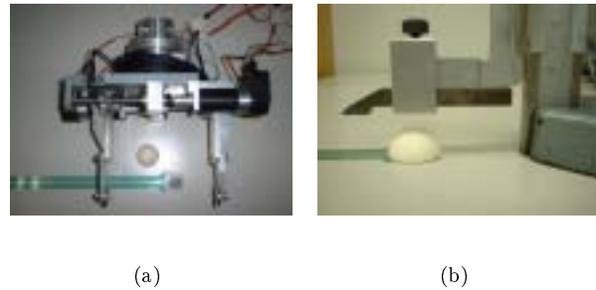


Fig.7 Experimental setup : (a) A two-fingered hand with tactile sensors, (b) Soft fingertip and height-gage

### 4.1 弾性力と最大変位との関係

実験は Fig.7(b) のように，半球型指先の下部にタクタイルセンサ (Fig.7(a)) を敷き，指先上部からハイトゲージを使用し荷重を加える．同時に，変形した（縮んだ）変位量を目盛で読み取り，グラフを作成し理論式 (13) と比較する．

ここで実験装置・器具について簡単に述べる．半球型指先は，ポリウレタン系の「人肌ゲル」(エクシールコーポレーション社製) を使用し，半球穴をくりぬいたアルミ材に注入し製作した．

タクタイルセンサは，Fig.7(a) のような厚さ 0.1mm の感圧フィルムで構成され，行と列に電極を配置することでその抵抗値の変化により 8 ビットの分解能を持つ．以下が実験結果である．

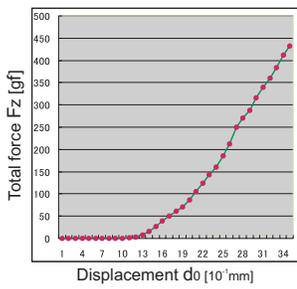


Fig.8 Obtained displacement and total force

#### 4.2 分布圧評価

本研究で導出した分布圧の理論式と実際にタクトイルセンサに現れる分布圧とを比較する．実験は Fig.7(a) のような 10 行 10 列のタクトイルセンサを用い， $x$  軸に近い 6 行目の分布圧を計測した．(10) 式において圧力項を取り出すと次の式になる．

$$P(\theta) = \frac{L_0 k_0}{S_0} \left( 1 - \frac{a - d_0}{\sqrt{a^2 - (a - d_0)^2 \tan^2 \theta}} \right) \quad (14)$$

極座標系から直交座標系に変換すると (14) 式は，(2) 式より次のようになる．

$$P(x, y) = \frac{L_0 k_0}{S_0} \left( 1 - \frac{a - d_0}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \quad (15)$$

実験を簡単化するために  $x$  軸上の分布圧の理論値のみを計算する．そのため (15) 式において， $y = 0$  とした．実験結果は以下のようになる．

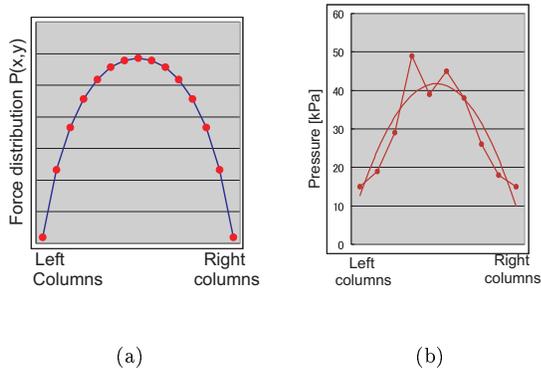


Fig.9 Measured pressure distribution : (a) Theoretical pressure, (b) Experiment pressure

#### 5. 考察

Fig.8 のグラフは，おおよそ  $F_z = b d_0^2$  ( $b$ : 定数) の放物線を描いている．これは，本研究で導出された (13) 式の有効性を証明するものである．

しかし，変位  $d_0$  が約  $2.7[mm]$  を超えると放物線軌道からはずれ直線になっている．これは推測であるが，指先上部から荷重を加え続けると指先が大きく変形し，センサとの接触面が徐々に広がる．このためセンサの

感圧セルから指がはみ出し，圧力測定不能領域を増やす結果になったからだと考える．

また，変位  $d_0$  が約  $0 \sim 1.1[mm]$  以下のとき，タクトイルセンサに圧力が全く現れていない．これはセンサ自体の性能によるしきい値の可能性がある．つまり，ある一定のしきい値となる圧力が加わるまでは力は現れない．この点においては，センサメーカーの詳細データを見る必要がある．

しかし，最終目標である 2 指ハンドによる物体把持については，本実験で現れた力よりさらに大きな力を指先に加えるため，センサに圧力が現れない部分，すなわち，変位が  $1.1[mm]$  以下は考慮する必要がない．

分布圧実験では，グラフが複雑になるのを防ぐためにタクトイルセンサの 6 行目を測定し Fig.9(b) を得た．センサの測定値を 2 次近似し (a)(b) を比較する．やはりセンサにはセルごとの性能差が見られらついた結果が得られたが，2 次近似することにより (15) 式より導かれる理論値に近いグラフが得られた．

本実験では，仮想ばねのパラメータ  $S_0, L_0, k_0$  を測定していないため，スケールに関しては議論していない．

#### 6. おわりに

人間の手や指のように，可能な限り速い 2 指ハンドの制御を行いたい．そのため，複雑になりがちな柔軟物のモデリングを簡単かつ，理論的に行った．

また，本研究で導出した弾性的性質を伴った指先に現れる力と変位量  $d_0$  との関係性の有効性を実証した．

今後は，モデリングにおいては 2 次元方向接触の研究を行い，実際にハンドを使った実験においては今回提案した関係式を用いて，物体の把持を実現させたい．

#### 参考文献

- 1) 前川，谷江，小森谷，”多指ハンド把握における触覚フィードバックを用いた動的握力制御”，計測自動制御学会論文集，vol.32,no.11,pp.1526-1534,1996
- 2) 並木，石川，”視触覚フィードバックを用いた最適把握行動”，日本ロボット学会誌，vol.18,no.2,pp.261-269,2000
- 3) S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, H.Y. Han and Z. Doulgeri, ”Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips”, *Robotica*, vol.18, pp.71-80, 2000
- 4) P.T.A. Nguyen and S. Arimoto, ”Performance of Pinching Motions of Two Multi-DOF Robotic Fingers with Soft-Tips,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2344-2349, 2001
- 5) 石川，下条，”ビデオ信号出力を持つ圧力分布センサと触覚パターン処理”，計測自動制御学会論文集，vol.24,no.7,pp.662-669,1988
- 6) 前川，谷江，金子，鈴木，堀江，菅原，”半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発”，計測自動制御学会論文集，vol.30,no.5,pp.499-508,1994
- 7) 韓，川村，”人間の手指とロボット指の皮膚弾性特性解析とモデリング”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.505-506, 1998
- 8) 金子，今村，横井，谷江，”摩擦を考慮した多指ハンドの剛性モデルによる安定把持解析”，日本ロボット学会誌，vol.7, no.3, pp.49-59, 1989