

# 半球型柔軟指の回転・転がり接触変形圧力モデル

井上 貴浩 平井 慎一 (立命館大学)

## A Pressure Model of Hemispherical Soft Fingertip via Rotation and Rolling

Takahiro Inoue and Shinichi Hirai

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.,

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: gr018026@se.ritsumei.ac.jp

**Abstract**— This paper proposes a new pressure model on the undersurface of a hemispherical soft fingertip when a finger rotates and an object rolls on the soft fingertip. First, we introduce the infinite number of virtual springs inside soft fingertip, and formulate a pressure equation based on geometrical analysis and mechanics of materials in consideration of the incompressibility of soft materials. Second, we define a rotational contact and a rolling contact on the soft fingertip, and simulate a pressure distribution that appears on a sensing plane. Finally, we integrate those two contact models, and evaluate our theoretical pressure model with experimental results in consideration of the center of pressure distribution.

**Key Words:** Soft fingertip, Pressure distribution, Elastic force, Tactile sensor, Potential

### 1. はじめに

剛体ではなく柔軟物を取り扱うとき重要になるのが圧力情報である。ゴムやシリコンゴム、ポリウレタンゴムなどの柔軟物に力を加えると容易に変形する。もしそれが円筒形状を成すとしてしよう (Fig.1)。上部よりある一定の力を加えると円筒要素下部には剛体の場合一定の大きさの等しい圧力が現れ、柔軟物の場合には明らかにある曲面形状を持った "分布圧" が現れる。この分布圧形状に関するパラメータを定式化し圧縮実験などにより抽出する必要がある。実は、アルミや鋼のような剛体においても圧力情報は重要である。つまり、応力である。材料強度実験での荷重 - 伸び線図と応力 - 歪線図を比べれば理解できよう。さらに、材料の絞りが発生する部分の断面積を考慮する真応力はその材料の特性をより深く示すことができる。

人間の指先も皮下組織において4種類の機械受容器により圧力情報を取得し、把持対象物の硬さ、鋭さ、形状、粘性、滑りと滑りの予知などを認識している<sup>1)</sup>。本研究は、上記のような "人間の触覚の模倣" というアプローチではなく、対象物の把持や操り動作を出来る限り簡単に解析的に解くための柔軟指の接触変形圧力モデルを導くことである。

Xydasら<sup>2,3)</sup>とKaoら<sup>4)</sup>は、ミーゼスの降伏応力や歪テンソルを使って指先が対象物に垂直に接触するときの接触半径と弾性力との関係が累乗則を満たすと提案した。また、ガンマ関数を使ってそのときの分布圧を定義し詳細な半球柔軟指の変形形状をFEMを使って忠実に再現している。しかし、これらは対象物と指先間の接触は垂直方向のみを想定し、その他の接触パターンは考慮していない。

本研究<sup>5)</sup>では、柔軟指を指先に取り付けたロボットフィンガの対象物への接触を考慮し、指先 - 対象物間の回転接触と弾性転がり接触を新しく定義する。次に、柔軟指内に線形仮想ばねを導入し上記2種類それぞれ

の接触時の指先下部に現れる圧力モデルを導出する。

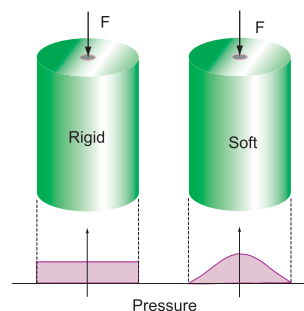


Fig.1 Each pressure shape of rigid and soft bodies

### 2. 回転接触における指先下部圧力モデルの導出

まず回転接触を定義しておこう。Fig.3のように指の先端に柔軟指を取り付けて回転しながら対象物に接触する形態を回転接触と定義する。対象物が固定された状態で指の回転により指先下部に現れる圧力モデルを導出する。詳しい導出過程を記述する前に、回転接触モデルの基礎となる並進接触モデル<sup>6,7)</sup>を簡単に述べておく。

Fig.2のように、指先内に導入した仮想ばねを考え、指先下部の任意の点R上の単一仮想ばねの自然長をQRとし、対象物の接触による縮み量をPQとする。このとき点Rでの圧力は、以下のように記述できる。

$$dP = E(1 - g(x,y))g(x,y), \quad (1)$$

$$g(x,y) = \frac{a - d - x \cdot \sin \theta_{obj}}{\cos \theta_{obj} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (2)$$

ここで、 $E$  はヤング率、 $\theta_{obj}$  は対象物の  $z$  軸に対する姿勢角、 $a$  は指先の半径、 $d$  は指先の最大変位量である。本稿での回転接触モデルは、(1) 式で書ける微小な圧力式を多数重ねることによって記述できる。

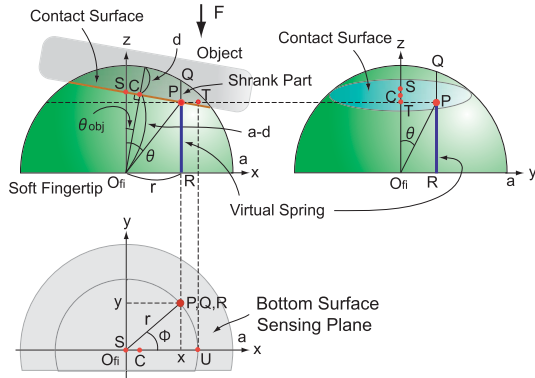


Fig.2 Translational contact model

Fig.3 のように対象物を固定し指を微小角ずつ回転する。まず、指が対象物と平行な初期状態から任意の角度  $\theta_k$  回転したときの指先下面の座標系を  $\Sigma_k$  とする。同座標系での指先下面任意の点  $R_k$  から  $z$  方向に立てた垂線と半球との交点を  $Q_k$ 、 $\Sigma_{k-1}$  座標系における半球との交点を  $V_k$  とすると、指が微小角  $\theta_k - \theta_{k-1}$  回転したときの点  $R_k$  上での微小変位を  $Q_k V_k$  と定義でき、 $Q_k R_k$  に微小仮想ばねを導入する。この微小仮想ばねの下端  $R_k$  に加わる圧力を以下のように定式化する。

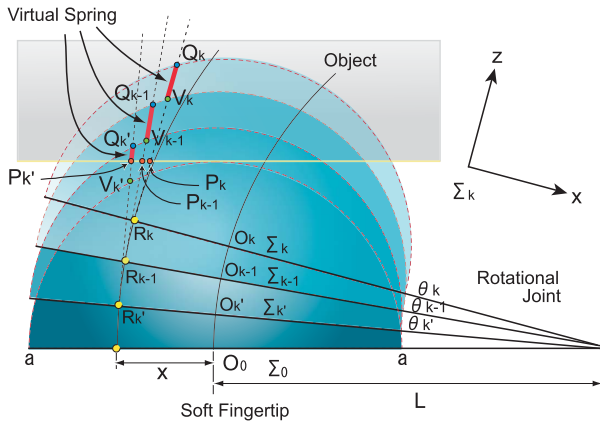


Fig.3 Rotational contact model

Fig.4 のように、回転接触をより一般的に扱うために初期平行時の指先と対象物間の隙間を  $d_{cl}$  とし指の厚みを  $2d_{fi}$  とする。さらに、指先下面座標系  $z$  軸から見た対象物の姿勢角を  $\theta_{obj}$  とし、 $\Sigma_k$  系原点  $O_k$  から接触平面に垂線を下ろした足を  $C_k$  とすると、Fig.3 より、指の微小回転  $\theta_k - \theta_{k-1}$  による仮想ばねの縮み量  $Q_k V_k$  は、以下のように表すことができる<sup>8)</sup>。

$$V_k Q_k = \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)} - t(x, y, \delta\theta_k). \quad (3)$$

ここで、 $\delta\theta_k$  は  $\theta_k - \theta_{k-1}$  を表し、 $t(x, y, \delta\theta_k)$  は  $V_k R_k$  の

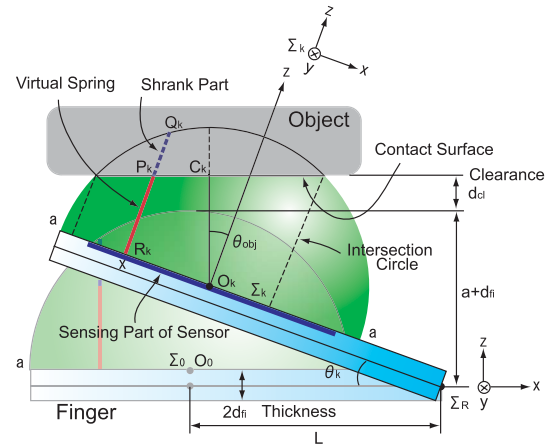


Fig.4 Actual contact mechanism of rotational contact

長さを示す以下のように表せるパラメータである。

$$t(x, y, \theta_k, \theta_{k-1}) = - (A \sin \theta_k + B \cos \theta_k) + \sqrt{a^2 - y^2 - (A \cos \theta_k - B \sin \theta_k)^2}, \quad (4)$$

$$A = ({}^0R_{kx} - {}^0O_{(k-1)x}), \quad B = ({}^0R_{kz} - {}^0O_{(k-1)z}). \quad (5)$$

さらにここで、 ${}^0R_{kx}$ 、 ${}^0R_{kz}$  は  $\Sigma_0$  系から見た点  $R_k$  の  $xz$  座標で、同じく  ${}^0O_{(k-1)x}$ 、 ${}^0O_{(k-1)z}$  は  $\Sigma_{k-1}$  系の半球の中心を示し、以下の座標を持つ。

$${}^0R_k : \begin{bmatrix} x \cos \theta_k + L(1 - \cos \theta_k) + d_{fi} \sin \theta_k \\ y \\ -x \sin \theta_k + L \sin \theta_k - d_{fi}(1 - \cos \theta_k) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^0O_{k-1} : \begin{bmatrix} L(1 - \cos \theta_{k-1}) + d_{fi} \sin \theta_{k-1} \\ 0 \\ L \sin \theta_{k-1} - d_{fi}(1 - \cos \theta_{k-1}) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

ここで、 $L$  は指の長さを示す。最終的に  $t$  は以下の式になる。

$$t(x, y, \delta\theta_k) = - \left\{ \sqrt{L^2 + d_{fi}^2} \sin(\delta\theta_k + \xi) + d_{fi} \right\} + \sqrt{a^2 - y^2 - \left\{ x - L + \sqrt{L^2 + d_{fi}^2} \sin(\delta\theta_k + \eta) \right\}^2}, \quad (8)$$

$$\tan \xi = \frac{-d_{fi}}{L}, \quad \tan \eta = \frac{L}{d_{fi}}.$$

したがって、(3) 式より縮み量  $Q_k V_k$  による点  $R_k$  に現れる圧力は次式になる。

$$dP = E \left( 1 - \frac{t(x, y, \delta\theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \frac{t(x, y, \delta\theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (9)$$

次に、縮み量  $P_k' Q_k'$  による点  $R_k$  に現れる圧力式を導く (Fig.3)。縮み量  $P_k' Q_k'$  は  $\Sigma_k$  座標系と  $\Sigma_{k-1}$  座標系の球間の縮み量ではなく、 $\Sigma_k'$  座標系の球と接触平面との縮み量であるため、Fig.2 のような並進接触で記述できる。したがって、(1)、(2) 式をそのまま利用でき、以下のように表せる。

$$dP = E (1 - h(x, y)) h(x, y), \quad (10)$$

$$h(x, y) = \frac{a + d_{cl} + d_{fi}(1 - \cos \theta'_k) - L \sin \theta'_k - x \sin \theta_{obj}}{\cos \theta_{obj} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (11)$$

最終的に (9) 式と (10) 式より点  $R_k$  に現れる圧力の合計は、以下の式になる。

$$dP = E \left[ \sum_{k=k'+1}^n \left( 1 - \frac{t(x, y, \delta \theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \frac{t(x, y, \delta \theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} + (1 - h(x, y)) h(x, y) \right]. \quad (12)$$

### 3. 弾性転がり接触における指先下部圧力モデルの導出

Fig.5 のように、最大変位量を一定に保ちながら対象物が指先上を移動する接触を、弾性転がり接触と定義する。一方、指先のヤング率がゴムに比べてかなり大きいときの対象物の転がり移動は、剛体指上で転がる従来の転がり接触を意味する。つまり、弾性転がり接触は剛体指上での転がりも含んだより一般的な表現である。

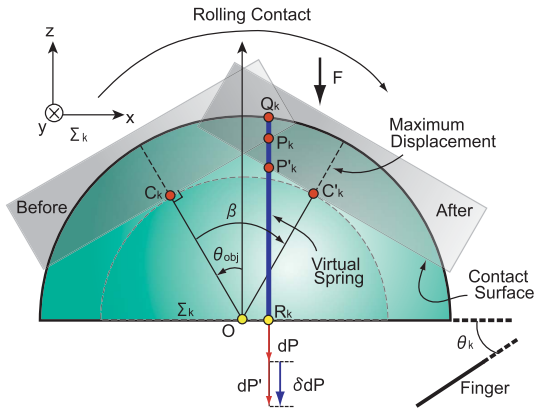


Fig.5 Rolling contact model

点  $R_k$  上の仮想ばねと転がり前の接触平面との交点を  $P_k$ ，転がり後の接触平面との交点を  $P'_k$  とする。対象物が指先上で  $\beta$ [deg] 転がるとすると、転がり前後で接触平面の方程式は以下の式になる。

$$(\sin \theta_{obj})x + (\cos \theta_{obj})z = \gamma, \quad (13)$$

$$\left\{ \sin(\theta_{obj} + \beta) \right\} x + \left\{ \cos(\theta_{obj} + \beta) \right\} z = \gamma, \quad (14)$$

$$\gamma = a + d_{cl} + d_{fi}(1 - \cos \theta_k) - L \sin \theta_k. \quad (15)$$

よって、 $\beta$ [deg] 転がることによる点  $R_k$  における圧力の差分は、以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \delta dP &= dP' - dP \\ &= E \left[ \{1 - w(x, y)\} w(x, y) - \{1 - v(x, y)\} v(x, y) \right], \quad (16) \end{aligned}$$

$$v(x, y) = \frac{\gamma - (\sin \theta_{obj})x}{\cos \theta_{obj} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}, \quad (17)$$

$$w(x, y) = \frac{\gamma - \left\{ \sin(\theta_{obj} + \beta) \right\} x}{\cos(\theta_{obj} + \beta) \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (18)$$

最後に、(16) 式と回転接触圧力モデル (12) 式を組み合わせることで、指の回転と対象物の弾性転がりを同時に満たす統合圧力モデルが導出できる<sup>8)</sup>。

$$dP_{new} = dP + \delta dP. \quad (19)$$

## 4. 実験

### 4.1 実験装置

本研究では、直径 40[mm] の柔軟指 (Fig.6-(a)) 下部における実際の圧力分布を計測し圧力中心の移動を抽出し、シミュレーションと比較する。指先下部圧力を計測するために高性能分布圧センサ (Fig.6-(b), 商品名：タクタイルセンサ, NITTA Corp.) を利用する。

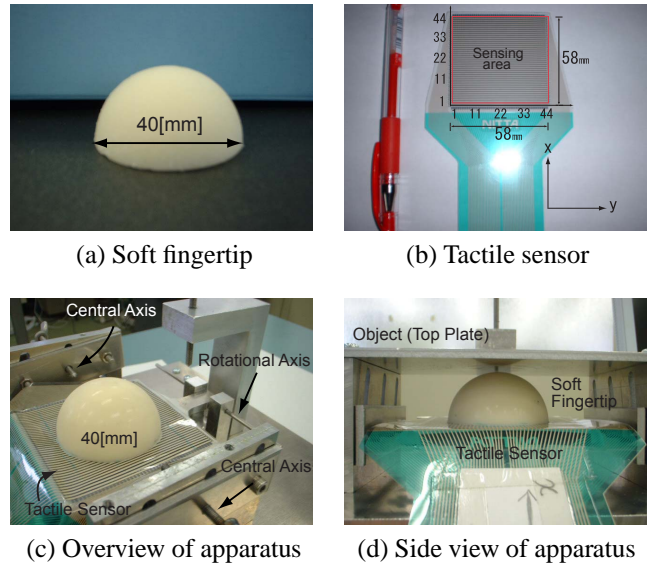


Fig.6 Setup and apparatus

分布圧センサは厚さ 0.1mm の感圧導電性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る電位差を圧力値に変換し専用の AD コンバータを通して直接 8 ビットの分解能を持つデジタル値として取得できる。今回使用したセンサは約 58[mm]×58[mm] のセンシング部、44×44 個の行列電極 (セル) を持ち、一回のサンプリングタイム (走査時間) は約 40[ms] 以下で動作可能である。

今回製作した実験装置 (Fig.6-(c),(d)) により、まず初期状態で指と対象物 (天井壁) 間を平行に保ち指のみを回転軸に沿って約 11.5[deg] まで回転させ、その後、指先の真下に配置した中心軸で指を支持し同軸回りに指を約 20.7[deg] 回転することで対象物の転がりを実現している。

### 4.2 ヤング率の計測

本稿では、ポリウレタンゴムから半球型柔軟指を作ると同時に試験片 (寸法:断面積 3mm×3mm) も複数製作



し、引張実験を行うことでヤング率を計測した。Fig.7は引張試験とその結果を示す。

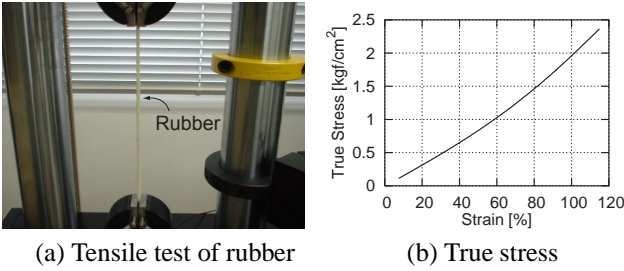


Fig.7 Young's modulus

本引張実験では、ゴムのような柔軟材料における大変形を無視できないため公称応力ではなく真応力を採用した。応力 - 歪線図 (Fig.7-(b)) から分かるように、グラフの傾きであるヤング率は非線形性を示す。つまり、柔軟指の変位量が小さいときにはヤング率は比較的低い値を示し、変位量が大きいときには高い値を示すことを意味する。実験データよりそれぞれのヤング率を求めると Table 1 のような結果となる。本稿では柔軟指の変形量が大きいことを考慮して、複雑化を避けるためシミュレーションにおいてヤング率を Max 値である 0.304[MPa] の一定値に設定した。

Table 1 Young's modulus

	Young's modulus [MPa]
Max	0.304
Min	0.135

### 4.3 実験結果

Fig.8 に圧力中心の移動とセンサ全体から計測される弾性力を示す。(b) は 3Dview の xy 面への正射影を表し (c) は側面図である。

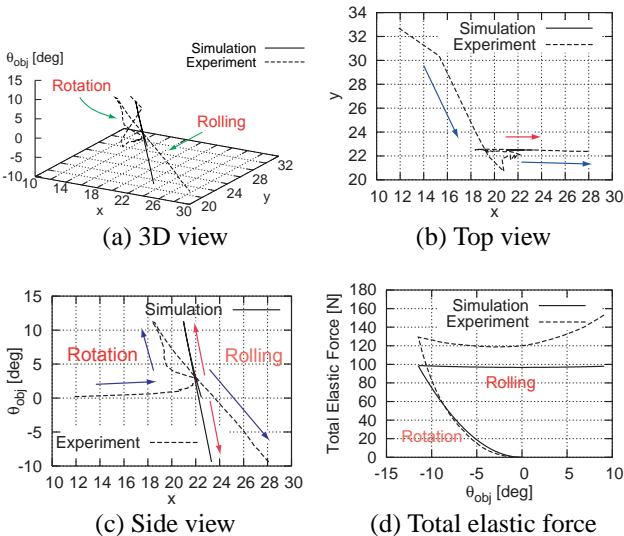


Fig.8 Simulation and experimental results

全体的に見ると Fig.4 より分かるように、指の回転が始まると圧力中心の移動は指先下部面上を左に進む。しかし、側面図において回転初期 (約 2.5[deg] まで) には興味深いことにシミュレーションとは全く異なった逆方向に進んでいることが分かる。これは、現モデルでは説明のつかない現象である。次に、対象物の弾性転がりにおいては実験結果の方が大きく移動していることが分かる。これは、現在のモデルでは単一の仮想ばねによる弾性力がそのばねの真下のみに加わると仮定しているためである。

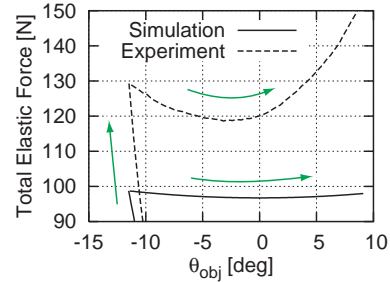


Fig.9 Enlarged view of total elastic force

Fig.9 は指の変形による全弾性力を拡大した図である。両結果において弾性力の極小値が見られる。特に、実験結果では相当大きな弾性ポテンシャルの極値が確認できた。さらに、物体姿勢角  $\theta_{obj}$  が 0[deg] になる直前に極小値に達している。この原因は弾性による歪エネルギーや横方向のばね要素によるポテンシャルに関係すると推察されるが詳細は分かっていない。

### 5. おわりに

柔軟指を有する回転関節指の回転・転がり接触モデルを導出し実験によって弾性ポテンシャルの極小値を見出した。

### 参考文献

- 1) 篠田: "皮膚の力学的構造に隠れている知能", システム/制御/情報, Vol.46, No.1, pp.28-34, 2002.
- 2) N.Xydas, I.Kao: "Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results", *Journal of Robotics Research*, Vol.18, No.8, pp.941-950, 1999.
- 3) N.Xydas, M.Bhagavat, I.Kao: "Study of Soft-Finger Contact Mechanics Using Finite Elements Analysis and Experiments", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2179-2184, 2000.
- 4) I.Kao, F.Yang: "Stiffness and Contact Mechanics for Soft Fingers in Grasping and Manipulation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.20, No.1, pp.132-135, 2004.
- 5) T.Inoue, S.Hirai: "Rotational Contact Model of Soft Fingertip for Tactile Sensing", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2957-2962, 2004
- 6) 井上, 平井: "柔らかい指先の 2 次元接触モデルと分布圧センサによる計測値との比較", 計測自動制御学会 SI 部門講演会予稿集, pp.393-394, 2002.
- 7) T.Inoue, S.Hirai: "Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2654-2659, 2003
- 8) T.Inoue: "Contact Models of Hemispherical Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing", *Master's Thesis*, pp.67-83, 2004.