

柔軟指を有する1自由度回転関節指の接触モデル

井上 貴浩 平井 慎一

Contact Model of 1 D.O.F. Finger Having Rotational Joint with Soft Tip

Takahiro Inoue and Shinichi Hirai

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.,

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

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

Abstract— In this paper, We will show you an easy model while rotational contact takes place between an object and a soft fingertip. First we will express a concept of prismatic and rotational contact between a soft fingertip and object. Second we derive a easy and reasonable contact model in condition that a rotational finger contacts with an object in detail. Finally we denote a simulation result when the angle of the finger takes 9[deg] through 20[deg] at interval of 1[deg]. This simulation result indicate that we can obtain a pressure distribution from a soft fingertip model we derived in this paper, and we conclude that the pressure distribution depends on a history of the deformation of the soft fingertip.

Key Words: rotational contact, soft fingertip, pressure distribution, tactile sensor

1. はじめに

柔軟指を用いたハンドリングに関する研究は近年増加している。前川ら¹⁾は、柔軟指内での指の変形による光の反射の差を利用して対象物の位置を認識し対象物を平行移動させる実験を実現している。しかし、対象物と指先間の接触においては従来通りの摩擦円錐を考慮した点接触を仮定している。田原ら²⁾は、剛体指を使ったモデルや対象物の安定把持・姿勢制御に関する解析・シミュレーションを行い、重力をも補償した制御系の設計を行っている。この剛体指での研究を進展させ柔軟指をハンド指先に取り付け同様な実験をし成果をあげている。しかし、その中で用いられた集中定数化した柔軟指の接触モデル³⁾⁴⁾では偶力が発生し対象物の姿勢制御実現が困難である。Shimogaら⁵⁾⁶⁾は、数種の材料を選びそれぞれの材料で作った指を使って衝撃試験を行いその吸収性などからシリコンゴムがロボットの指に適しているとした。ここでは柔軟指の基礎実験にとどまって応用には至っていない。Xydasら⁷⁾は、柔軟指の接触実験を行いMisesの応力条件を考慮した弾塑性力学の観点から理論を展開しているが、指先に対して垂直方向のみの接触に限定している。

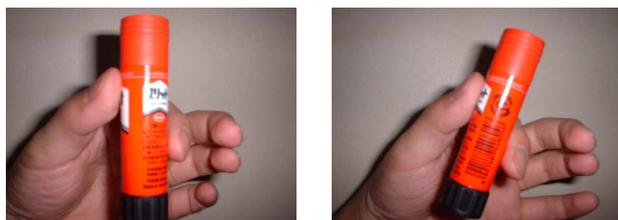


Fig.1 Manipulation by human fingers

人間の指は対象物に対して、剛体指であれば偶力が発生しそうな位置に親指と人差し指を配置しても容易

に安定把持・姿勢制御を実現できる (Fig.1)。人の指は粘弾性の特徴を持ち指先の復元力もしくは弾性エネルギーによって安定把持を実現していると考えられる。

上記のように、柔らかい指先の接触に関する正確かつ簡単なモデルの研究はほとんどなされておらず、ハンド全体の制御系を構築するためにも柔軟指の特性を考慮したモデルの導出を実現しなければならない。井上ら⁸⁾は、柔らかい指先に対象物が垂直に接触するときの1次元接触モデルを導出した。ここでは、接触により発生する指先全体の弾性力とその縮み量の2乗に比例すると結論づけた。また、垂直2次元平面内での接触を考慮した2次元接触モデル⁹⁾¹⁰⁾においては、仮想ばねによる指先下部に現れる分布圧中心から対象物の姿勢を推定可能であるとした。本研究では、現在までに導出した並進接触モデルを進展させ回転接触モデルを導く。最後に、指先下部に現れる分布圧情報は指先変形の履歴に依存するという概念を述べる。

2. 回転接触モデル

2.1 回転接触の概念

回転接触とは、Fig.2のように指が回転ジョイントを持つときの指先の対象物への接触を指す。

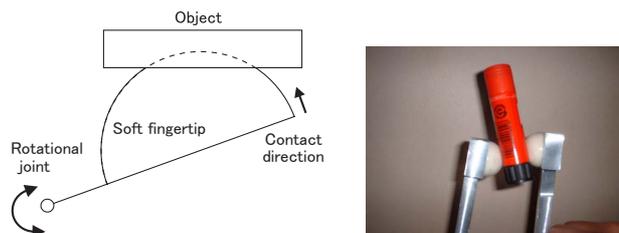


Fig.2 Rotational contact

従来の我々の研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾では、出来る限り簡単な柔らかい指先の接触モデルを導くことに主眼を置き、対象物が柔軟指に対して垂直方向もしくは斜め方向に接触する場合のモデリングを行ってきた。しかし、並進接触モデル (Fig.3) では指の関節が回転関節の場合には対応できないため、より一般的な接触モデルである回転関節を伴った指先の対象物への接触をモデリングしなければならない。

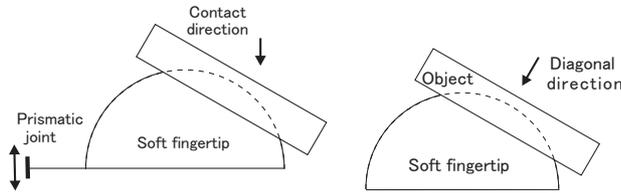


Fig.3 Prismatic contact

本研究では、指先-対象物間の回転接触に伴う柔軟指の変形を仮想ばねを導入することで導き、従来の並進接触では考慮していなかった、または考慮する必要のなかった、指先の変形が対象物との接触の履歴に依存するという概念をはじめて導入し導出した式に展開する。

2.2 回転接触モデルの導出

1 自由度回転関節を有する指の指先に柔軟指を取り付け、対象物と柔軟指の接触変形モデルを Fig.4 に示す。指先が対象物に接触し始めた位置を初期状態とする。そのときの指先座標系を Σ_0 、指の回転角が $\theta_{k-2}, \theta_{k-1}, \theta_k$ のときの座標系をそれぞれ $\Sigma_{k-2}, \Sigma_{k-1}, \Sigma_k$ とする。また、 Σ_0 座標系から見た指先座標系の任意の点 R_{k-2}, R_{k-1}, R_k から垂線を伸ばし指先の半球曲面と交差する点を Q_{k-2}, Q_{k-1}, Q_k とし、その直線と直前の座標系における半球曲面との交点を V_{k-1}, V_k とする。さらに、それぞれの直線と対象物との交点を P_{k-2}, P_{k-1}, P_k とする。ここで、点 R_{k-2}, R_{k-1}, R_k はそれぞれの指先座標系から見ると等しい点を意味する。また対象物は固定されているものとする。 L は指の指先半球の中心までの距離、 r は柔軟指の半径、 x は指先下部平面での座標である。

各 $Q_k V_k, Q_{k-1} V_{k-1}$ に仮想ばねを導入し、回転角度ごとの仮想ばねの縮みによる弾性力が点 R に加わるものとする。 θ_1 から θ_n まで指を回転させると、Fig.4 から分かるようにある角度 $\theta_{k'} (0 < \theta_{k'} < \theta_n)$ で $Q_{k'} V_{k'}$ による弾性力ではなく $Q_{k'} P_{k'}$ による弾性力に切り替わることになる。Fig.5 は、 Σ_0 の Z 軸方向から見下ろした指先下部面の楕円形状を表している。Fig.6 は、接触により現れる指先と対象物との接触円の集合を表す。対象物により指先が押され変形すると接触面は徐々に広がり変形形状は常に円を描くと考えられる。変形が大きくなるにつれて円の中心は Fig.4 でも見られるように徐々に右に移動し半径は大きくなる。以下に幾何学的な回転接触モデルの導出過程を詳しく述べる。 Σ_0 座標系から見た Σ_k 座標系上の座標は (1) 式のような変換行列を満たす。

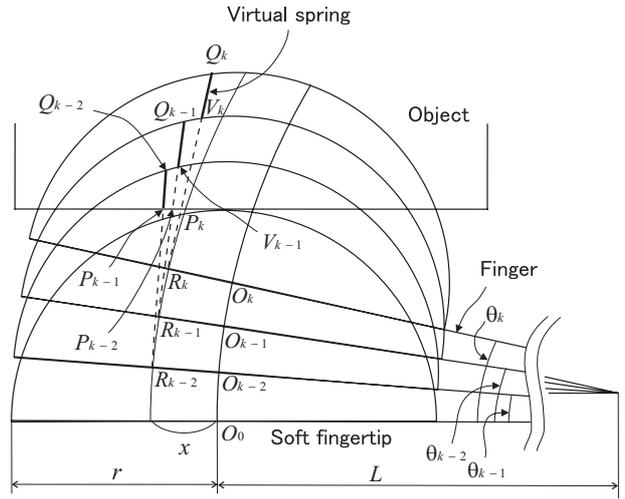


Fig.4 Rotational contact model

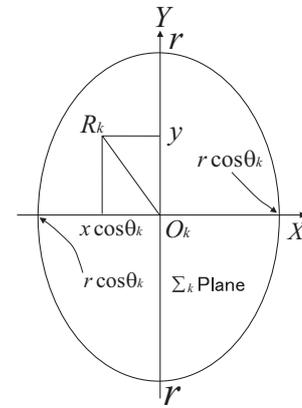


Fig.5 Top view of the fingertip coordinate Σ_k

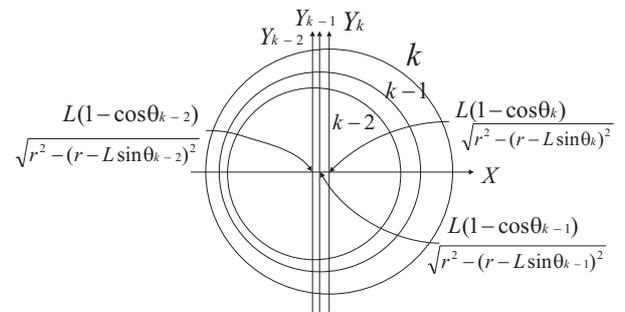


Fig.6 Circle group of the contact plane

$$\begin{bmatrix} x_k^0 \\ y_k^0 \\ z_k^0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & 0 & \sin \theta_k & L(1 - \cos \theta_k) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_k & 0 & \cos \theta_k & L \sin \theta_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^k \\ y_k^k \\ z_k^k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 x_k^0, y_k^0, z_k^0 は Σ_0 座標系から見た x_k, y_k, z_k の座標で、 x_k^k, y_k^k, z_k^k は Σ_k 座標系から見た座標である。 $(x_k^k, y_k^k, z_k^k), (x_{k-1}^{k-1}, y_{k-1}^{k-1}, z_{k-1}^{k-1})$ などは指先下部面の同一点 R を指しているため以下ではまとめて、 (x, y, z) と

書く．よって，各点 P_k, Q_k, R_k は， Σ_0 座標系で表すと以下のように表現できる．

$$P_k : \begin{bmatrix} R \tan \theta_k + L - (L-x) / \cos \theta_k \\ y \\ R \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q_k : \begin{bmatrix} \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)} \sin \theta_k + L + (x-L) \cos \theta_k \\ y \\ \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)} \cos \theta_k - (x-L) \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_k : \begin{bmatrix} L + (x-L) \cos \theta_k \\ y \\ -(x-L) \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

次に，直線 $R_k Q_k$ を求めパラメータ t を使って表示すると (5) 式になる．

$$\begin{cases} x = \sin \theta_k \cdot t + L + (x-L) \cos \theta_k \\ y : \text{const} \\ z = \cos \theta_k \cdot t - (x-L) \sin \theta_k \end{cases} \quad (5)$$

一方， Σ_{k-1} の指先球の方程式は以下ようになる．

$$\{x - L(1 - \cos \theta_{k-1})\}^2 + y^2 + \{z - L \sin \theta_{k-1}\}^2 = r^2 \quad (6)$$

(5),(6) 式より，直線 $Q_k R_k$ と Σ_{k-1} の半球との交点 V_k は，

$$V_k : \begin{bmatrix} \sin \theta_k \cdot t_k + L + (x-L) \cos \theta_k \\ y \\ \cos \theta_k \cdot t_k - (x-L) \sin \theta_k \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} t_k &= -L \sin(p) \\ &+ \sqrt{L^2 \sin^2(p) - L^2 - (q)^2 - 2L(q) \cos(p) + r^2 - y^2} \\ p &= \theta_k - \theta_{k-1} \\ q &= x - L. \end{aligned}$$

以上より，点 R に加わる仮想ばねによる弾性力は指先材料（ポリウレタン）の弾性係数 E と (3),(7) 式を使って Fig.4 から (8) 式のように導かれる．

$$\begin{aligned} dF &= k(x, y) \cdot \left(\sum_{k=k'+1}^n \|\overrightarrow{Q_k V_k}\| + \|\overrightarrow{P_k' Q_k'}\| \right) \\ &= E \left\{ \sum_{k=k'+1}^n \left(1 - \frac{t_k}{\sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \cos(\theta_n - \theta_k) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{r - (L-x) \sin \theta_{k'}}{\cos \theta_{k'} \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \cos(\theta_n - \theta_{k'}) \right\} dS \\ &= E u(x, y, \theta_k) dS. \quad (8) \end{aligned}$$

右辺第一項は，仮想ばねの変位が $P_{k'} Q_{k'}$ に切り替わるまでの点 R に加わる弾性力の合力を意味し，右辺第二項は，仮想ばねの変位が $P_k Q_k$ のときの弾性力を意味

する．また， $k(x, y)$ は指先下部における任意の点 R でのばね定数を意味し $k(x, y) = EdS / \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}$ である¹⁰⁾．(8) 式では Σ に相当する部分が重要であり，対象物と指先間での回転接触においては接触変形の履歴に依存するという意味を意味する．

2.3 圧力モデル

(8) 式を圧力モデルに変換する．Fig.4 において，仮想ばね $Q_k R_k$ を考えると $Q_k R_k$ は仮想ばねの自然長であり $Q_k V_k$ は縮み量になる．Fig.7 のように，仮想ばねと仮定した微小円筒要素は体積を一定に保ちながら圧縮される．圧縮される前を dS ，後を dS' とすると (9) 式のような関係が得られる．この (9) 式を (8) 式に代入することで最終的に (10) 式のような圧力の関係式が導かれる．

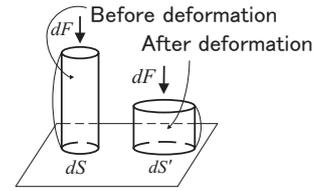


Fig.7 Deformation under constant volumn

$$\begin{aligned} dS &= \left(\left\{ r \tan \theta_k + (L-x) \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_k} \right) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \{r - (L-x) \sin \theta_k\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} dS' / \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)} \\ &= v(x, y, \theta_k) dS' \quad (9) \end{aligned}$$

$$dP(x, y, \theta_k) = dF / dS' = E \cdot u(x, y, \theta_k) \cdot v(x, y, \theta_k) \quad (10)$$

ここで，

$$\begin{aligned} u(x, y, \theta_k) &= E \left\{ \sum_{k=k'+1}^n \left(1 - \frac{t_k}{\sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \cos(\theta_n - \theta_k) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{r - (L-x) \sin \theta_{k'}}{\cos \theta_{k'} \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \cos(\theta_n - \theta_{k'}) \right\}, \\ v(x, y, \theta_k) &= \left(\left\{ r \tan \theta_k + (L-x) \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_k} \right) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \{r - (L-x) \sin \theta_k\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} / \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}. \quad (11) \end{aligned}$$

3. シミュレーション

前章で導出した圧力モデル ((10) 式) を使用し指先下部に現れる分布圧形状を評価する．本研究では，指先の圧力をセンシングするためのセンサとして NITTA 社製のタクタイルセンサ (Fig.8(a)) を指下に敷き使用する．これはサンプリングタイム 1[ms] で，リアルタイムで分布圧のセンシングが可能になる．ここでサンプリン

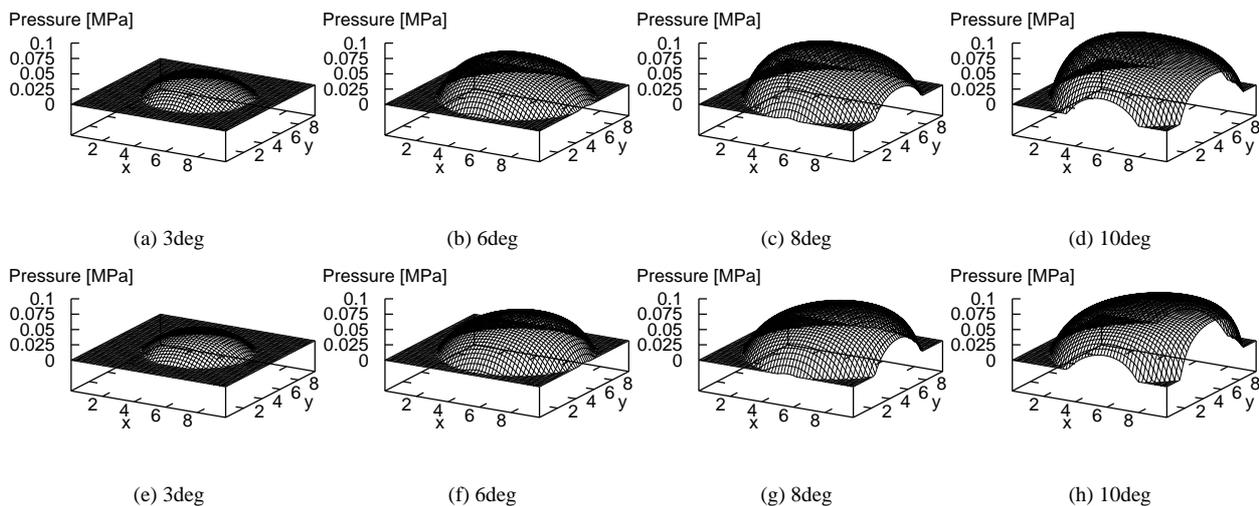


Fig.9 Simulation result : (a)-(d) rotational contact, (e)-(h) prismatic contact

グタイムとは、Fig.8(a)のようにセンサ1フレーム(100セル)ごとのループタイムを意味する。センサ1セルに対して8bitの分解能を持つため800[bit/ms]のパフォーマンスを実現している。つまり、1フレームの分布圧形状を1[ms]で取得可能である。

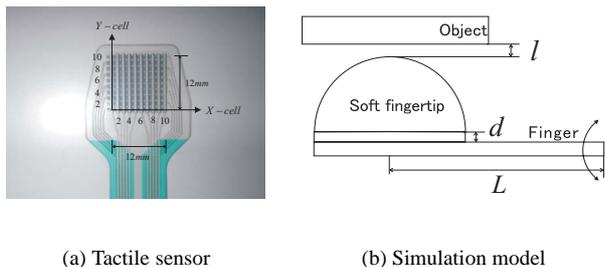


Fig.8 Set up of simulation

次に、(10)式の導出過程では理解を容易にするためにFig.4の最も簡単なモデルを利用した。しかし、シミュレーションではより一般性を持たせるために、Fig.8(b)のようにセンサ下部と指の間にオフセット d を設け、対象物と指先間には隙間 l を設けた。指 L を20[mm]、指先半径 r を10[mm]に設定し並進接触のシミュレーション結果と比較するためにオフセット d と隙間 l をそれぞれ0[mm]に設定した。シミュレーションでは θ_k を1[deg]から12[deg]まで変化させ3[deg],6[deg],8[deg],10[deg]の並進接触と回転接触の分布圧形状シミュレーション値をプロットした(Fig.9)。X座標値の小さい側が指の根元側に相当し、それを中心に回転している。X軸とY軸はセンサセル行列の番号を、Z軸は圧力の大きさをそれぞれ示す。

4. 結論

Fig.9より分かるように、以前に導出した並進接触モデルと回転接触モデルとでは分布圧形状が異なることが分かる。回転接触モデルの圧力中心が並進接触モデルのそれよりも中央側に近い事が見てとれる。これはFig.4より直感的に理解される。

本論文では、指先の変形履歴に依存した回転接触モデルを導出した。回転角 θ_k が大きいたときの圧力分布が飽和している様子が示された。これは、並進接触モデルにおいても同様であるが、微小要素の体積一定変形において断面積 dS' が無限に拡大してしまうところに起因する。この点を修正し最終的には、対象物の指先上での転がりや並進方向への押しが生じたときの回転接触モデルと並進接触モデルの融合した式を導きたい。また、本稿で紹介した分布圧センサを使用し実機による計測を行い今回導出した回転接触モデルの妥当性を検証したい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 田原, J.H.Bae, 中村, 有本: "2本指口ポットを用いた Sensoryfeedback による物体の安定把持・姿勢制御", 日本ロボット学会学術講演会予稿集, CD-ROM, 3E13, 2002.
- 3) 田原: "2本指口ポットを用いた Sensoryfeedback による物体の安定把持・姿勢制御", Doctoral dissertation, Department of Robotics, Ritsumeikan Univ. 2002.
- 4) 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.
- 5) K.B.Shimoga, A.A.Goldenberg: "Soft Robotic Fingertips Part I: A Comparison of Construction Materials", *Journal of Robotics Research*, Vol.15, No.4, pp.320-334, 1996.
- 6) K.B.Shimoga, A.A.Goldenberg: "Soft Robotic Fingertips Part II: Modeling and Impedance Regulation", *Journal of Robotics Research*, Vol.15, No.4, pp.335-350, 1996.
- 7) 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.
- 8) 井上, 金, 平井: "物体操作のためのタクトイルセンサを用いた柔らかい指先のモデリング", 日本ロボット学会学術講演会予稿集, CD-ROM, 3E25, 2002.
- 9) 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.
- 10) T.Inoue, S.Hirai: "Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing", which will be presented in *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, in Las Vegas U.S., 2003.