

半球型柔軟指の変形に伴う弾性ポテンシャル エネルギーを用いた準静的操り

井上 貴浩 平井 慎一 (立命館大学)

Quasi-Static Manipulation with Potential Energy of Hemispherical Soft Fingertip

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— We have already derived a minimum value of an elastic potential energy due to the deformation of a hemispherical soft fingertip. In this paper, we propose a quasi-static manipulation process and algorithm using the minimum value by means of two rotational fingers, on which the soft fingertips are mounted. We have four geometrical constraint between a grasped object and two soft fingertips, which include normal and tangential constraints. In this algorithm, we introduce an energy function which includes that of four constraint forces. By computing all these variables, we clarify that the grasped object is determined uniquely from the proposed algorithm. Finally, we demonstrate that two rotational robotic fingers can manipulate the object stably as well as simulation results.

Key Words: Soft fingertip, Grasping, Quasi-Static, Manipulation

1. はじめに

人が器用に対象物を把持しいとも簡単に操ることができるのには様々な要因が考えられるが、指の柔らかさに起因する指先と対象物間の面接触が大きな役割を果たしている。指先が大きく変形することで接触面が広がり弾性エネルギーも蓄えられる。それに伴って指先の弾性力も増加するため、自然と対象物を強く把持し安定に把持することが可能になる。この事実は当然のことであり、従来の研究ではなぜ簡単にかつ安定に把持できるのかという議論はなされていない。

柔軟指に関する変形モデルは現在まで多く提案されてきた。最も簡単な放射状線形ばねモデル¹⁾やFEM²⁾などがその例である。しかし、前者は対象物を自由に操るために複雑な制御則を要し、後者においてはリアルな変形形状を提案しているが、モデル化のみに終始しそのモデルを使ったハンドリングの研究までは至っていない。

我々は現在まで半球型柔軟指内部に線形ばねを垂直方向に配置し、指全体での弾性力と弾性ポテンシャルエネルギーを解析的に導出してきた。また、上記の物理量が共に指先変位量の2乗と3乗にそれぞれ比例し、指先と対象物間の接触角余弦の1乗と2乗に半比例することを示した。さらには、弾性エネルギーがある接触角のときに極小値を持つことも明らかにし、この知見が柔軟指での対象物操りの安定性に大きく貢献していることを議論してきた。

本論文では、上記の指先変形による弾性エネルギーの極小値の概念（以下 Local Minimum of Elastic Potential Energy on Hemispherical Soft Fingertip : LMPE と呼ぶ）を利用して2回転関節ハンドによる準静的操り理論を展開する。まず、接触時に発生する4つの幾何学的拘束

式を導出し、エネルギー関数を使った極小値探索問題を解くことで2指によって把持された対象物の位置と姿勢が一意に決まることを示す。最後にステッピングモータを使った2指口ポットハンドにより対象物を静的に操り、本研究で提案する手法の妥当性を検証する。

2. 指先変形弾性力とポテンシャルエネルギー

著者らは現在までに、柔軟指と剛体対象物間の接触時に現れる弾性力とポテンシャルエネルギーを以下のように導出した^{3,4,5,6)}。

$$\|F\| = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_{obj}} \quad (1)$$

$$P = \frac{\pi E d^3}{3 \cos^2 \theta_{obj}} \quad (2)$$

ここで、 E は指先柔軟材料のヤング率を示し d は指先最大変位量、 θ_{obj} は接触角を示す。式(1)はFig.1に示したように、対象物が指先に対して垂直方向に移動しながら接触する場合の指先変形全体での弾性力であり、式(2)はそのときの弾性ポテンシャルエネルギーである。ここで、式(2)を最大変位量 d で偏微分しても式(1)と等しくならない。式(1)は垂直上向きの弾性力であり、 d で偏微分した弾性力はFig.1で示したように式(1)の d 方向成分である。一方で、指先と対象物間の接触角が $\theta_{obj} = 0$ のとき、上記の物理量は互いに等しくなる。式(1)、(2)から得られる知見は、接触力を垂直方向に限定した場合弾性力とポテンシャルエネルギーが解析的に解け、それらが変位量 d の2乗と3乗にそれぞれ比例し接触角 θ_{obj} の余弦の1乗と2乗にそれぞれ反比例することである。従来の柔軟指のモデリングに関する研究では、接触角という概念はない。さらに

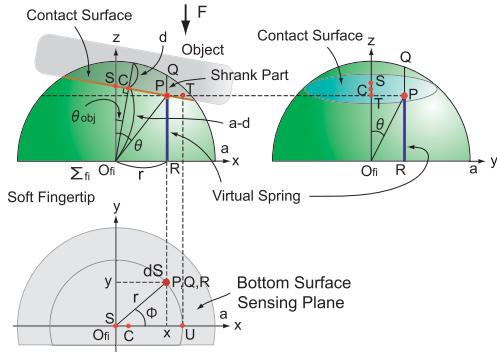


Fig.1 Contact mechanics for soft fingertip

式 (2) から分かるように、ポテンシャルエネルギーは接触角がゼロのときに極小値 (LMPE) を持つ。本稿では、LMPE を考慮した 2 指回転関節ロボットハンドによる準静的操り動作に焦点を当て、指先内部エネルギー関数を定義し極小値探索を行うことによって操り対象物の位置と姿勢を数値的に解くアルゴリズムを提案する。

3. 準静的操り

3.1 幾何学的拘束

本論文で記述する 2 指回転関節ハンドを Fig.2 に示す。2 次元平面内での議論に限定し指や指先、対象物に関する慣性は無視する。

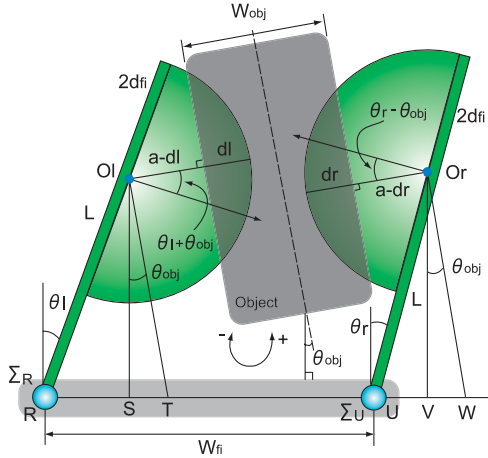


Fig.2 Soft fingered manipulation

Fig.2 に示したように、指先と対象物の接触において左右両指それぞれ 2 つずつの幾何学的拘束を持つ。まず、指の長さを L 、左右両指の変位量をそれぞれ d_l, d_r 、指の厚みを $2d_{fi}$ 、指の回転角をそれぞれ θ_l, θ_r 、対象物の幅を W_{obj} 、指の回転軸間の距離を W_{fi} とし、反時計回りを正の方向とする。このとき点 R を原点にとると、左右半球の中心点 O_l, O_r はそれぞれ以下ようになる。

$$\mathbf{O}_r = \begin{bmatrix} W_{fi} - L \sin \theta_r - d_{fi} \cos \theta_r \\ L \cos \theta_r - d_{fi} \sin \theta_r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

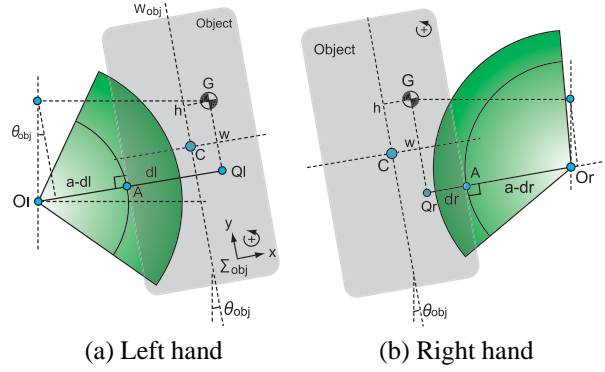


Fig.3 Normal constraints

$$\mathbf{O}_l = \begin{bmatrix} L \sin \theta_l + d_{fi} \cos \theta_l \\ L \cos \theta_l - d_{fi} \sin \theta_l \end{bmatrix}. \quad (4)$$

両指それぞれに対して法線方向拘束と接線方向拘束が存在し、法線方向拘束式を以下の手順で導出する。Fig.3-(a) に示すように、対象物の幾何中心 C を原点に持つ対象物座標系を Σ_{obj} 、対象物の体積密度を一定にした上での質量重心 (以下では単に重心と呼ぶ) を $G(w, h)$ とする。また、参照座標系 Σ_R で表した重心を $G(x_{obj}, y_{obj})$ 、指先と対象物間に現れる接触円の中心を A 、重心 G から点 O_l 、 A を通る直線に下ろした垂線の足を Q_l とすると、距離 $O_l Q_l$ は、以下のような幾何学的関係式で表せる。

$$O_l Q_l = (x_{obj} - O_{lx}) \cos \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{ly}) \sin \theta_{obj}. \quad (5)$$

よって、指先変位 d_l を伴った面接触による拘束により、以下のような法線拘束式を得る。

$$(x_{obj} - O_{lx}) \cos \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{ly}) \sin \theta_{obj} = (a - d_l) + \frac{W_{obj}}{2} + w. \quad (6)$$

右指先に関する対象物接触面法線方向への拘束条件も同様に導かれ、Fig.3-(b) に示すように、以下の関係式を得る。

$$-(x_{obj} - O_{rx}) \cos \theta_{obj} - (y_{obj} - O_{ry}) \sin \theta_{obj} = (a - d_r) + \frac{W_{obj}}{2} - w. \quad (7)$$

ここで、 (O_{rx}, O_{ry}) 、 (O_{lx}, O_{ly}) は、(3)、(4) 式での xy 座標成分を表す。結果的に (6)、(7) 式は、対象物を把持することにより構成される閉リンクによって現れる法線方向の幾何拘束である。

次に接線方向拘束式を導出する。Fig.4 に示すように、対象物が指先上で転がる前後での姿勢角をそれぞれ $\theta_{obj,b}$ 、 θ_{obj} とし、 Σ_{obj} 座標系原点 C を通る中心線を引く。また、点 O_l と接触点 A を通る直線を引き、重心 G から中心線へ下ろした垂線の足を P 、垂線との交点を Q_l とし、各点の座標を Σ_{obj} 座標系で $P(w, 0)$ 、 $Q_l(w, s_l)$ とする。以上より、対象物が指先上を半径 $a - d_l$ で転がる時、線分 GQ_l は転がり移動量 AA' が加わることに伴い、 GQ_l' に変化し以下の式を得る。

$$GQ_l' = h - s_l - (a - d_l) \cdot (\theta_{obj} - \theta_{obj,b}). \quad (8)$$

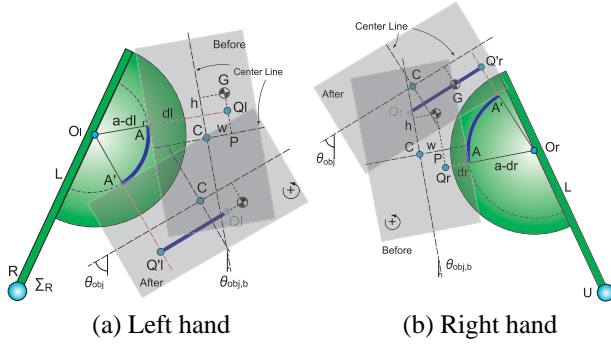


Fig.4 Tangential constraints

一方, Fig.3 に示すように, 接線方向の幾何学的関係は, 以下のように表現できる.

$$GQ_l = -(x_{obj} - O_{lx}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{ly}) \cos \theta_{obj}. \quad (9)$$

以上より, 半径 $a - d_l$ の転がり動作によって現れる接線拘束式は, 以下のように導かれる.

$$-(x_{obj} - O_{lx}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{ly}) \cos \theta_{obj} = h - s_l - (a - d_l) \cdot (\theta_{obj} - \theta_{obj,b}). \quad (10)$$

同様に, 右指先上での転がりによる拘束式は, 以下のように示される.

$$-(x_{obj} - O_{rx}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{ry}) \cos \theta_{obj} = h - s_r + (a - d_r) \cdot (\theta_{obj} - \theta_{obj,b}). \quad (11)$$

ここで, s_r は, Fig.3-(b) に示すように, Σ_{obj} 座標系で表した点 $Q_r(w, s_r)$ の y 成分を意味する. 以上のように (10), (11) 式は, 対象物の両指指先上での転がりによって現れる, 接線方向の幾何拘束である.

3.2 極小値探索アルゴリズム

第2章で述べた, 単一柔軟指上での弾性転がり接触変形による, 弾性ポテンシャルエネルギーの極小値の概念を2指回転関節ハンドに拡張する. Fig.2のような, 剛体対象物を把持する動作を考え, 両指の変形によるポテンシャルエネルギーを (2) 式より以下のように示す.

$$P = \frac{\pi E}{3} \left\{ \frac{d_r^3}{\cos^2(\theta_r - \theta_{obj})} + \frac{d_l^3}{\cos^2(\theta_l + \theta_{obj})} \right\}. \quad (12)$$

2指ハンドが対象物を把持し落とさない範囲内で, 両指の関節角 (θ_r, θ_l) が任意に変化したとき, (12) 式で示される指先の変形による弾性ポテンシャルエネルギーが, 極小値を満たすような左右両指の最大変位量 (d_r, d_l) , 対象物の位置・姿勢 $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj})$ を, 数値計算により求める. ここで, 本論文で提案する準静的操り動作手順をまとめると, 以下ようになる.

1. 左右両指の関節角 (θ_r, θ_l) を入力角として任意に決める.
2. (12) 式より, 弾性ポテンシャルエネルギーの極小値を求める.
3. そのときの (d_r, d_l, θ_{obj}) を求める.
4. 対象物重心位置 $G(x_{obj}, y_{obj})$ を重心計算により求める.

ここで, 対象物と柔軟指先間で滑りは生じないものとする.

本研究における4つの拘束式, (6), (7), (10), (11) 式はホロノミック拘束であるから, 未定乗数 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$ を導入し, 左右指先変形を含めた系全体のエネルギー関数 I を, 以下のように定義できる.

$$I(\mathbf{p}, \mathbf{f}) \triangleq P - \mathbf{f} \cdot \mathbf{g}. \quad (13)$$

ここで, \mathbf{p} はシステム全体の物理変数であり \mathbf{g} は4つの幾何拘束式を示す. 上式で表されるエネルギー関数が極小値を満足するような, 一般化座標の組を求める. よって, 本稿で提案する準静的操りアルゴリズムを一般的に記述すると, 以下のように示される.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } I \\ & \text{Subject to } \mathbf{g} = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (14)$$

本論文では, 両指の回転角 (θ_r, θ_l) は入力角度であり既知であるため, 最終的に一般化座標は, 以下のような9変数になる.

$$\mathbf{q} = [d_r, d_l, x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, f_1, f_2, f_3, f_4]^T. \quad (15)$$

(14), (15) 式より, 柔軟指の変形を含めた操りシステム全体での静力学的つり合い関係は, 以下の9元連立非線形方程式になる.

$$\frac{\partial I(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{0}. \quad (16)$$

式 (16) を数値的に解くことで9つの一般化座標が一意に存在することを示す.

4. シミュレーション

本論文で行った対象物準静的操り動作に関するシミュレーション手順を以下に示す.

1. Fig.2において, θ_r, θ_l を両指内側に 7.2[deg] 傾ける (動作1).
2. 反時計回りに両指を 20[deg] 回転する (動作2).
3. 時計回りに両指を 40[deg] 回転する (動作3).
4. 3.の動作を3回繰り返す.
5. 反時計回りに両指を 20[deg] 回転し 1.の動作終了後の状態に戻す (動作4).
6. 最後に, θ_r, θ_l を 0[deg] に戻す (動作5).

なお, 本シミュレーションにおいて用いられたパラメータはすべて, 次章で示す2指回転関節ロボットハンドのパラメータに等しい. 前章で述べたLMPE探索アルゴリズムを利用したシミュレーション結果は次章で示す実験結果に重ねてプロットしている.

5. 実験

5.1 実験準備

本研究で提案したポテンシャルエネルギー極小値 (LMPE) 探索アルゴリズムの妥当性を検証するための実験装置を以下に説明する. Fig.5 に示したように, 半径 20[mm] の柔軟指を製作し2指回転関節ロボットハンドの先端に取り付け, ステッピングモータによって低速回転を維持することによって, 静的な操り動作を実現している. 本システムに関する他のパラメータは Table 1 に示した.

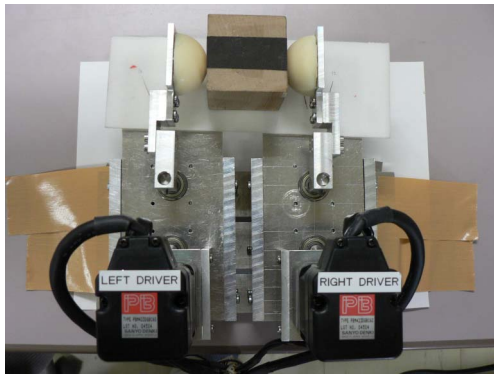


Fig.5 Apparatus

Table 1 System parameter

Parameters	Values
Finger length : L	76.2 [mm]
Fingertip radius : R	20 [mm]
Object width : W_{obj}	49 [mm]
Finger thickness : d_{fi}	4 [mm]
Young's modulus : E	0.30378 [MPa]
Gear ratio	108
Input pulse	1[kHz]

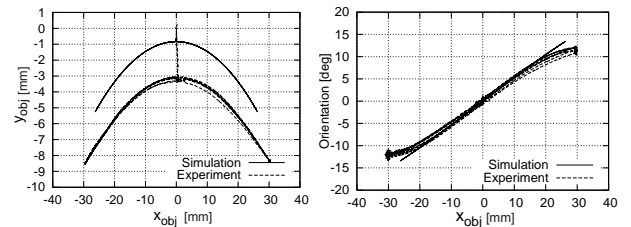
5.2 実験方法

本実験において対象物上部に長方形の黒色目印を貼付け、装置上部に設置した CCD カメラによって対象物の輝度重心を計算し位置と姿勢を求めた。

5.3 実験結果

Fig.6 に実験結果を示す。Fig.6-(a) において横縦軸はそれぞれ対象物重心の移動量を表す。ここで原点 (0,0) は Fig.5 から分かるように操り動作スタート時の重心の位置である。まず、シミュレーションと実験結果の両方において動作 1 時に大きく真下方向に移動することが分かる。動作 2~4 の対象物操り動作においても、ほぼ等しい軌跡を追従していることが分かる。

次に、Fig.6-(b) では、横軸に重心の x 座標、縦軸に把持対象物の回転角を示す。実験結果では明確に S 字カーブが見て取れる。つまり指の回転角が大きくなるにつれて対象物が回転しづらくなることを示している。この現象は対象物の回転角の増加と共に、対象物と両指先間の接触角が増加することに起因する。つまり Fig.2 における接触角 $\theta_r - \theta_{obj}$ と $\theta_l + \theta_{obj}$ が増加することによって Fig.7 に示したように、ポテンシャルエネルギーが増加しその結果、指先変形による弾性力が増加しその力が対象物の回転を抑える方向への力として加わることになる。人の指によっても確かめることが容易にできる。また、Fig.6-(b) のシミュレーション結果においてもわずかに S 字カーブが見て取れる。本研究で提案してきた垂直方向への線形仮想ばねのみによるモデルであっても実験値と同様の結果が得られた。S 字カーブの誤差については、柔軟材料の非圧縮性（ポアソン



(a) Position of gravity center (b) Orientation angle

Fig.6 Comparison with simulation and experiment

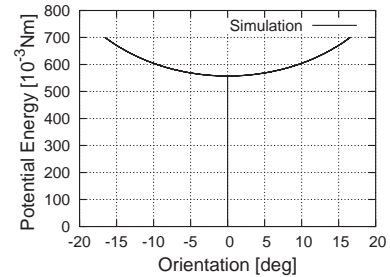


Fig.7 Potential energy of both fingertips in simulation

比=0.5) に起因する体積一定変形をモデルに組み込むことで解決される。

6. おわりに

本稿では、LMPE を使ったエネルギー関数を定義し極小値探索アルゴリズムを提案することによって、2 指回転関節ロボットハンドによる操り動作において対象物の位置と姿勢が常に一意に決まることを示した。また実験においても同様の結果を得た。本研究から、人指による対象物操り動作においても、指先形状による非線形性が存在した、柔らかさに起因する LMPE が存在することが推察される。これらの事実により、人がいとも簡単に物体を把持し操っていると考えられる。今後は、システム全体のダイナミクスを考慮した理論を展開したい。

参考文献

- 1) 長瀬, 中島, 早川, 傍島: "ソフトフィンガーを用いた対象物の把握・操りの制御", 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.5, pp.518-527, 2004.
- 2) N.Xydas, M.Bhagavat and 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.
- 3) T.Inoue and 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.
- 4) T.Inoue and S.Hirai: "Rotational Contact Model of Soft Fingertip for Tactile Sensing", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2957-2962, 2004.
- 5) T.Inoue and S.Hirai: "Local Minimum of Elastic Potential Energy on Hemispherical Soft Fingertip", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2319-2324, 2005.
- 6) T.Inoue and S.Hirai: "Quasi-Static Manipulation with Hemispherical Soft Fingertip via Two Rotational Fingers", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1947-1952, 2005.