

柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明

井上 貴浩 平井 慎一 (立命館大学 ロボティクス学科)

Experimental Investigation of Mechanics in Soft-fingered Grasping and Manipulation

Takaniro Inoue and *Shinichi Hirai (Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.)

Abstract— This paper describes modeling of soft fingertips for soft-fingered grasping and manipulation. Based on the observations of soft-fingered grasping and manipulation, we propose a parallel distributed model with tangential deformation of hemispherical soft fingertips. The proposed model reflects the structure of a human finger consisting of a soft fingertip with a hard fingernail on its reverse side. We experimentally verified our proposed parallel distributed model.

Key Words: Grasping, Manipulation, Finger, Soft fingertip, Model

1 緒言

本報告では、柔軟指操作の観察結果を基にして柔軟指の力学モデルを構築する。柔軟指における物体の把持と把握の力学を解明するために、半球形状の柔らかい指先を有する一対の回転指を用いる。このような簡単な系では、柔軟指の変形特性が明確に観察でき、柔軟指による把持と操作の力学モデルを構築できると期待できる。

関連研究

有限要素 (FE) 解析は、物体の変形の研究に広く用いられている。Xydas と Kao は、有限要素解析を用いて半球柔軟指の変形形状を計算した [1, 2, 3]。有限要素解析により把持と操作の過程を数值的にシミュレーションすることができるが、複雑な定式化のため把持や操作の理論的な解析に用いることはできない。たとえば、動的な把持過程における物体の把持可能性や安定性は、把持や操作における重要な概念である。有限要素解析は手続的なモデルであるため、把持可能性や安定性等の理論的な解析には適用できない。したがって、柔軟指による把持と操作を解析し説明することができる簡単なモデルが必要である。

ヘルツ接触モデルは、弾性体の二次曲面の接触による変形を表す簡単で解析的な表現である [4]。ヘルツ接触モデルでは、曲面に境界がないと仮定しているため、硬い板で支えられている半球形状の弾性指先には適用できない。Arimoto らは、一対の柔らかい指先による摘み操作の動力学を定式化した [5]。指先に放射分布モデルを採用し、解析力学を用いて物体の把持と操作の制御則を導いた [6]。彼らが新たに提案した多体系上の安定性の概念に基づき、二自由度の指と一自由度の指の対により物体の安定把持と姿勢制御が可能であることを理論的に証明した [7, 8]。彼らは、物体と指先との転がり接触が安定把持と姿勢制御の要であることを示した。しかしながら、次節で述べる観察結果は、一対の一自由度指が安定把持と姿勢制御を実現できることを示唆する。これは、新しい指先モデルが必要であることを意味する。

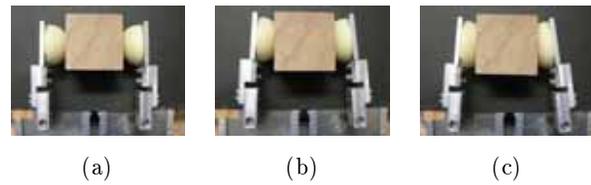


Fig.1 Deformation of fingertips when two fingers rotate in the opposite direction

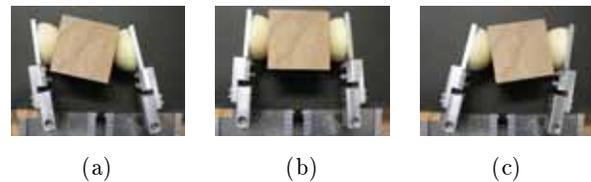


Fig.2 Motion of object when two fingers rotate in the same direction

2 柔軟指操作の観察

2.1 一対の一自由度指による把持と操作

柔軟な指先を有する一対の指による物体の把持と操作を観察する。各指は回転の一自由度を持つ。まず、双方の指を内側に動かし、指先の変形を観察する。Fig. 1 に物体と指先の写真を示す。二つの関節が内側に回転すると、指先の変形が大きくなる。すなわち、物体に作用する把持力が大きくなる。これは、二つの関節角により把持力が調節可能であることを意味する。次に、一方の指を内側に他方の指を外側に動かし、物体の姿勢を観察する。Fig. 2 に物体と指先の写真を示す。二本の指が反時計回りに回転するとき物体は時計回りに回転し、その逆も成り立つ。これは、二つの関節角により物体の姿勢が調整可能であることを示唆する。物体の回転方向は、二本の指の回転方向とは逆であることに注意する。

上述の観察は、柔軟な指先を有する一対の回転指により、把持力と物体の姿勢の双方を独立に制御できることを示唆する。従来の研究では、一対の回転指では

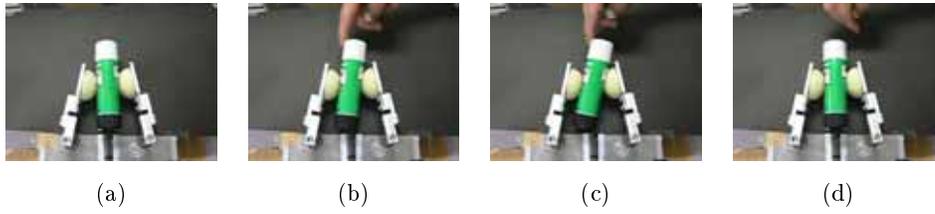


Fig.3 Pinched object rotation by external force

把持力のみが制御可能であり、物体の姿勢は制御できないとされていた。これは、上記の観察と矛盾する。従来の研究では、Fig. 4-(a) に示す放射分布モデルが用いられている。接触力は半球の中心を通る。接触力の大きさは、柔軟指の最大変形量に依存するが、物体と指との相対姿勢には依存しない。二つの放射分布モデルによる一対の接触力は偶力を発生し、結果として偶力を打ち消すためには第三の自由度が必要となる。したがって、上述の観察結果を説明するためには、柔軟指の最大変形量と物体と指との相対姿勢の双方に依存する、新しい柔軟指モデルが必要である。

2.2 外力による把持物体の回転

物体を一対の柔軟指で把持し指の姿勢を固定する。次に物体に外力を加え、物体の運動を観察する。Fig. 3 に物体の運動を撮影した結果を示す。指先が変形するため、外力により物体は回転する。外力を解放すると、物体は初期の姿勢に戻るよう回転する。これは、物体が指先表面上を滑べないことを意味する。これから、回転制約とよばれる幾何学的な制約が導かれる。指の関節角に一定の値を与え、二つの回転制約を解くと、物体の姿勢が一意に定まる。これは上記の観察結果と矛盾する。放射分布モデルでは、柔軟な指先の半球上の任意の点は、半球の中心に向かって移動する。すなわち、柔軟指先内の弾性要素は、法線方向にのみ変形し、接線方向には変形しない。上記の矛盾は、接線方向の変形を考慮していない点に起因する。したがって、外力による把持物体の回転を表すためには、接線方向の変形を指先モデルに導入する必要がある。

3 柔軟指モデル

第 2 節の観察結果を基に、柔軟な指先の力学モデルを構成する。Fig. 4-(a) に、従来の研究で用いられている放射分布モデルを示す。半球柔軟指の自然状態における半径を a 、指の材料のヤング率を E で表す。弾性要素は指の内部に放射状に配置される。すべての弾性要素は自然長が等しいため、弾性要素の断面積を dS で表すと、弾性要素のバネ係数はすべて $E dS/a$ で表される。柔軟指と剛体の平らな表面との接触により、指先は変形する。柔軟指の最大変位を d 、指と物体の相対姿勢を θ_p とする。個々の弾性要素は、それぞれの収縮に応じて弾性力を発生する。すべての弾性力を積分すると、物体に作用する弾性力が得られる。積分を計算すると、接触力の大きさは

$$F_{\text{radial}} = \pi E d^2 \quad (1)$$

であり、接触力は半球指の中心を通過することがわかる。接触力の大きさは、最大変位 d のみに依存し、相対姿勢 θ_p には依存しない。

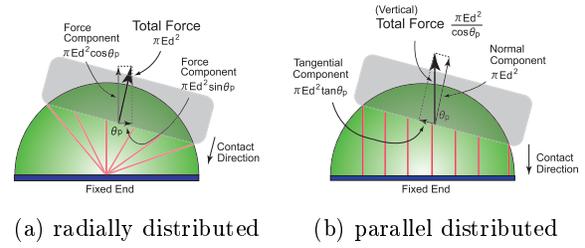


Fig.4 Fingertip models

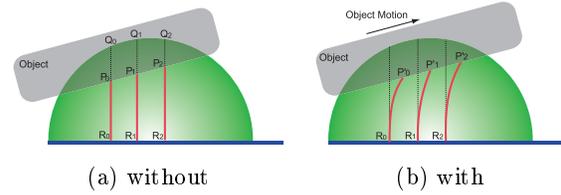


Fig.5 Tangential deformation in the parallel distributed model

Fig. 4-(b) に提案する平行分布モデルを示す。弾性要素は柔軟指内部に平行に配置されている。弾性要素の自然長は、要素の場所によって異なる。弾性要素の位置を座標 (x, y) で表す。弾性要素の自然長は $(a^2 - x^2 - y^2)^{1/2}$ であり、結果として弾性要素のバネ係数は $E dS/(a^2 - x^2 - y^2)^{1/2}$ となる。最大変位 d と相対角度 θ_p が弾性要素の収縮量を定める。個々の弾性要素が発生する弾性力を積分し、接触力の大きさを求めると

$$F_{\text{perp}} = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_p} \quad (2)$$

であり、接触力は指の背後の平面に垂直である。接触力の大きさは、最大変位 d ならびに相対姿勢 θ_p に依存する。これは、背後が硬い板で支えられている柔軟指の半球形状に起因する。この構造は、柔らかい指先と硬い爪から構成されている人の指を反映している。

個々の弾性要素のポテンシャルエネルギーを積分すると、平行分布モデルのポテンシャルエネルギーが次のように得られる。

$$U_{\text{perp}}(d, \theta_p) = \frac{\pi E d^3}{3 \cos^2 \theta_p}. \quad (3)$$

ポテンシャルエネルギーは、最大変位 d のみならず相対角度 θ_p に依存する。

第 2 節で述べたように、把持物体が外力により回転する現象を表すためには、平行分布モデルに接線方向の変形を導入する必要がある。Fig. 5 に接線方向の変形のモデルを示す。Fig. 5-(a) に示すように、接線方向

の変形なしの状態では指先が物体に接触すると仮定する．平行分布モデルでは，指先表面上の点 Q_k は，点 P_k まで移動し，自然長 $Q_k R_k$ の弾性要素が $P_k R_k$ まで収縮する．Fig. 5-(b) に示すように，物体が接線方向に距離 d_t 移動したと仮定すると，点 P_k は P'_k まで移動する．結果として，弾性要素に接線方向の変位 $P_k P'_k$ が生じる．物体の位置と姿勢を与えると，各弾性要素の垂直な変形 $Q_k P_k$ と接線方向の変形 $P_k P'_k$ を計算できる．接線方向の変形は接線方向の力を生成する．簡単のため，ヤング率 E が接線方向の力と変位の線形関係を定めると仮定する．すべての弾性要素の接線力を積分すると，物体に作用する接線力が以下のように求められる．

$$F_{\text{tangent}} = 2\pi E d d_t. \quad (4)$$

放射分布モデルにおける接触力の垂直成分と水平成分は， $F_{\text{radial}} \cos \theta_p$ ならびに $F_{\text{radial}} \sin \theta_p$ で与えられる．これは，平行分布モデルにおける成分 $F_{\text{perp}} + F_{\text{tangent}} \sin \theta_p$ ならびに $F_{\text{tangent}} \cos \theta_p$ と異なる．平行分布モデルにおいて各弾性要素の接線方向の変形によるポテンシャルエネルギーを積分すると，接線方向の変形で生じる全ポテンシャルエネルギーが以下のように得られる．

$$U_{\text{tangent}}(d, d_t, \theta_p) = \pi E \{d^2 d_t \tan \theta_p + d d_t^2\}. \quad (5)$$

垂直な変形と接線方向の変形は直交しないので，上式はこれらのカップリングを含む．結果として，平行分布モデルにおける半球柔軟指の全ポテンシャルエネルギーは，次式で表される．

$$U_{\text{parallel}}(d, d_t, \theta_p) = U_{\text{perp}}(d, \theta_p) + U_{\text{tangent}}(d, d_t, \theta_p). \quad (6)$$

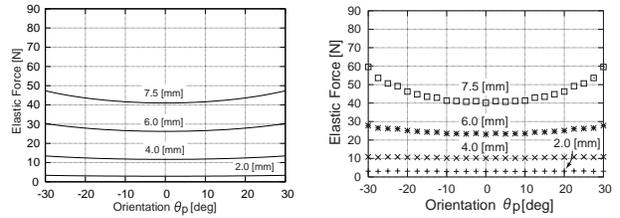
全ポテンシャルエネルギーは，最大変位 d ，接線方向の変位 d_t ，相対角度 θ_p に依存する．

4 検証実験

第3節で述べた平行分布モデルを実験的に検証する．ポリウレタン製で直径 40 mm の半球指先を検証に用いる．ポリウレタンの引張圧縮試験を行い，ヤング率 $E = 0.23 \text{ MPa}$ を得た．ロードセルで柔軟指による弾性力を計測する．Fig. 6 にシミュレーションならびに実験の結果を示す．グラフの横軸は指と物体の相対角度，縦軸は弾性力の大きさを表す．最大変位は 2.0 mm，4.0 mm，6.0 mm，7.5 mm である．Fig. 6-(a) に示すシミュレーション結果では，最大変位 d が一定である限り，接触力の大きさは $\theta_p = 0$ で最小になる．Fig. 6-(b) に示す実験結果においても， $\theta_p = 0$ において接触力の大きさが最小となる．すなわち，平行分布モデルにおける接触力は，実験結果と一致する．放射分布モデルにおいては，弾性力の大きさは一定であり，指の背後の面に垂直な成分は $\theta_p = 0$ において最小ではなく最大となる．すなわち，放射分布モデルは実験結果と一致しない．

5 シミュレーション

平行分布モデルを基に，柔軟な指先を有する一対の一自由度指による物体の把持と操作のシミュレーションを行った．Fig. 7 にシミュレーションモデルを示す．左



(a) simulation (b) experiment

Fig.6 Simulation and experimental results

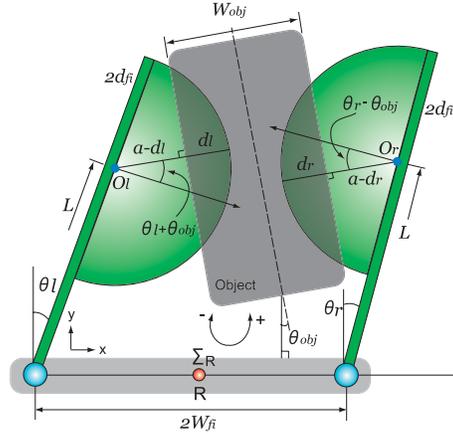


Fig.7 Simulation model

右の指の回転角を，それぞれ θ_l と θ_r で表す．二本の指は同じ寸法を持っていると仮定する．半球指の中心と指の関節の距離を L とする．一対の指が，幅 W_{obj} の長方形物体を把持する．物体の位置ベクトルを $(x_{\text{obj}}, y_{\text{obj}})$ ，姿勢を θ_{obj} で表す．物体と左指との相対角度は $\theta_r - \theta_{\text{obj}}$ で，物体と右指との相対角度は $\theta_l + \theta_{\text{obj}}$ である．左指の最大変位と接線方向変位を d_l と d_{lt} で表す．左指の角度 θ_l と物体の位置 $(x_{\text{obj}}, y_{\text{obj}})$ と姿勢 θ_{obj} がこれらの変位を定める．右指の最大変位と接線方向変位を d_r と d_{rt} で表す．右指の角度 θ_r と物体の位置および姿勢がこれらの変位を定める．

一対の一自由度指による物体の把持と操作には，5 個の一般化座標がある．すなわち，物体の位置 x_{obj} ならびに y_{obj} ，物体の姿勢 θ_{obj} ，二本の指の回転角度 θ_l ならびに θ_r である．最大変位 d_l ならびに d_r と接線方向変位 d_{lt} ならびに d_{rt} は，これらの一般化座標の関数である．指と物体は水平面内を運動し，重力エネルギーは無視できると仮定する．系のポテンシャルエネルギーは，左右の指のポテンシャルエネルギーの和であり，次式のように表される．

$$U = U_{\text{parallel}}(d_l, d_{lt}, \theta_l + \theta_{\text{obj}}) + U_{\text{parallel}}(d_r, d_{rt}, \theta_r - \theta_{\text{obj}}). \quad (7)$$

物体の質量を m_{obj} ，物体の重心回りの慣性モーメントを I_{obj} とする．各指の回転軸回りの慣性モーメントを I_{finger} で表す．指先の変形による質量移動は無視できると仮定すると，系の運動エネルギーは次式のように表される．

$$T = \frac{1}{2} m_{\text{obj}} (\dot{x}_{\text{obj}}^2 + \dot{y}_{\text{obj}}^2) + \frac{1}{2} I_{\text{obj}} \dot{\theta}_{\text{obj}}^2 +$$

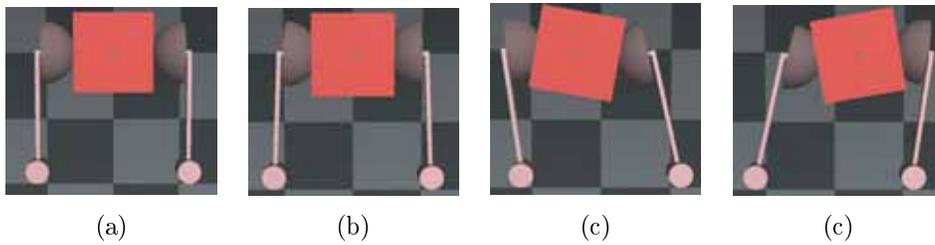


Fig.8 Simulation of posture control of grasped object

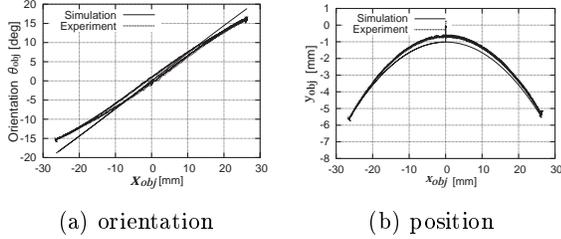


Fig.9 Comparison between simulation and experimental results

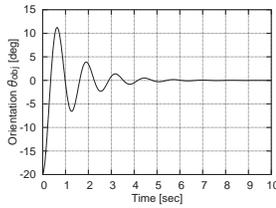


Fig.10 Simulated object orientation angle

$$\frac{1}{2} I_{\text{finger}} \dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2} I_{\text{finger}} \dot{\theta}_r^2. \quad (8)$$

(7)(8) 式から，一対の指が物体を把持している系におけるラグランジュの運動方程式を導くことができる．さらに，運動方程式に粘性項を導入する．

Fig. 8 に一対の指による物体の姿勢制御のシミュレーションを示す．Fig. 8-(a) では，指先が変形することなく物体に接触している．Fig. 8-(b) は初期把持であり，左右の指先が同じ変形を示している．Fig. 8-(c) では，両方の指が反時計回りに回転し，物体が時計回りに回転する．Fig. 8-(d) では，両方の指が時計回りに回転し，物体が反時計回りに回転する．平行分布モデルに基づく以上のシミュレーション結果は，Fig. 2 に示す観察に一致する．さらに，このシミュレーションは，柔らかい指先を有する一対の一自由度回転指により物体の姿勢を制御できることを示唆する．

Fig. 9 に，物体の姿勢制御におけるシミュレーションと実験結果の比較を示す．Fig. 9-(a) は，物体の姿勢 θ_{obj} と把持物体の座標 x_{obj} との関係を表す．シミュレーションでは実験的に同定したヤング率の値を用いた．図に示すように，シミュレーションと実験は一致するが，姿勢角度が大きくなると違いが大きくなる．Fig. 9-(b) は，把持物体の位置を表す．シミュレーションと実験結果は一致している．

Fig. 10 に，外力による把持物体の回転運動のシミュレーション結果を示す．グラフは外力が解放された後の物体の姿勢を表す．シミュレーション結果は，Fig. 3

に示す観察の結果と一致している．

上述のシミュレーションより，提案する平行分布モデルは，柔軟指による物体の把持と操作を良く説明できることがわかる．また，平行分布モデルによるシミュレーションでは，柔らかい指先を有する一対の一自由度回転指により物体の姿勢を制御できること，指を動かさない場合でも物体の運動は安定であることを示唆しており，柔軟指による物体の把持と操作では制御則やセンシングを単純化できる可能性がある．

6 結言

本報告では，柔軟指による物体把持と操作のために，半球柔軟指の力学モデルを述べた．柔軟な指先を有する一対の一自由度指による物体の把持と操作を観察し，観察結果を説明できる新しいモデルとして，平行分布モデルを提案した．提案した平行分布モデルを支持する実験結果とシミュレーション結果を示した．

参考文献

- [1] Xydas, N. and Kao, I.: *Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics with Experimental Results*, Int. J. of Robotics Research, Vol. 18, No. 8, pp.941-950, 1999.
- [2] Xydas, N., Bhagavat, M., and Kao, I.: *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] Kao, I. and Yang, F.: *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.
- [4] Johnson, K. L.: *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1985.
- [5] Arimoto, S., Tahara, K., Yamaguchi, M., Nguyen, P., and Han, H. Y.: *Principle of Superposition for Controlling Pinch Motions by means of Robot Fingers with Soft Tips*, Robotica, Vol. 19, pp.21-28, 2001.
- [6] Nguyen, P. and Arimoto, S.: *Performance of Pinching Motions of Two Multi-DOF Robotic Fingers with Soft-Tips*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2344-2349, 2001.
- [7] Doulergi, Z., Fasoulas, J., and Arimoto, S.: *Feedback Control for Object Manipulation by a pair of Soft Tip Fingers*, Robotica, Vol. 20, pp.1-11, 2002.
- [8] Fasoulas, J. and Doulergi, Z.: *Equilibrium Conditions of a Rigid Object Grasped by Elastic Rolling Contacts*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.789-794, 2004.