

柔軟指による物体操作のダイナミクス

Dynamics of Object Manipulation by a Pair of Soft Fingertips

井上 貴浩, 平井 慎一 (立命館大学 ロボティクス学科)

Abstract: This paper describes dynamics of object manipulation performed by a pair of soft fingertips. Soft fingertips enable secure grasping and stable manipulation yet the mechanics of soft-fingered manipulation has not revealed well. Based on the observations of soft-fingered grasping and manipulation, we found that grasping and posture control of a rigid object can be performed by a pair of 1-DOF fingers with soft tips, which contradicts to previous theories on soft-fingered manipulation. In this paper, we propose a parallel distributed model with tangential deformation of hemispherical soft fingertips to formulate the grasping and posture control by a pair of 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 then formulate the dynamics of grasping and manipulation performed by a pair of soft fingertips. Experimental results validate the proposed model and formulated dynamics.

Keywords: grasping, manipulation, soft fingertips, hand, dynamics

1 緒言

発達した脳と眼, 指と手にある膨大な感覚器と運動器により, 人間は物体の把持と操作において高い巧緻性を発揮できる. 解剖学の面から人の手指の構造は, 物体を把持し操ることに適していることが知られている. さらに人の爪は, 小さい物体を摘み上げるのみならず, 柔らかい指先を支持することにより指先感覚器の高い感受性を実現していると言われている. 人間の手指は物体の把持と操作に優れているため, ロボティクスの分野では柔軟指操作に関する研究が多く進められている. しかしながら, 硬い爪で支えられた柔らかい指先がどのような力学に基づき, どのように物体の把持と操りに貢献しているのかは明確でない. 本報告では, 柔軟指操作の観察結果を基にして, 柔軟指先の新しい力学モデルを構築する. 柔軟指による物体把持と操作における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.

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値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]. さらに, 物体の把持と操作における巧緻性をそれらに必要な自由度数で表すことを提唱し, 新たに提案した多様体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, 柔らかい指先を有する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.

そこで本報告では, 柔軟指の新しいモデルとして平行分布モデルを提案する. モデルの妥当性を実験的に示し, 柔軟指による把持と物体操作のダイナミクスを平行分布モデルに基づいて定式化する. さらにダイナミクスの妥当性を実験的に検証する.

2 柔軟指操作の観察

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

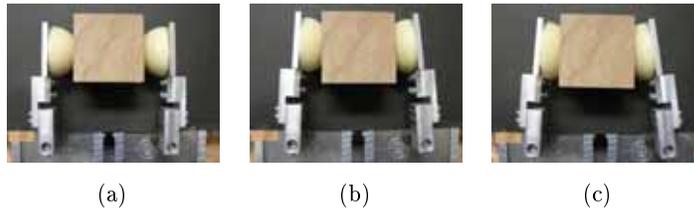


Fig.1: Deformation of fingertips when two fingers rotate in the opposite direction

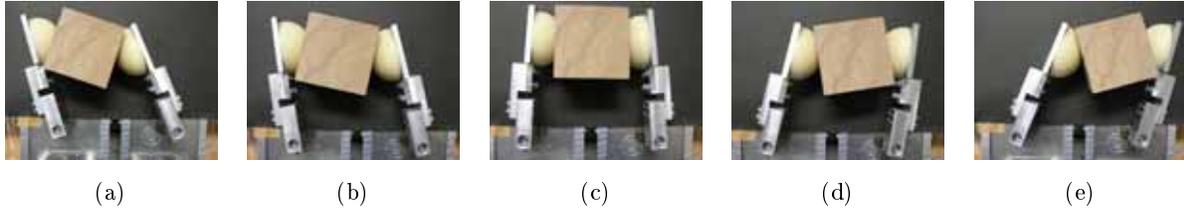


Fig.2: Motion of object when two fingers rotate in the same direction

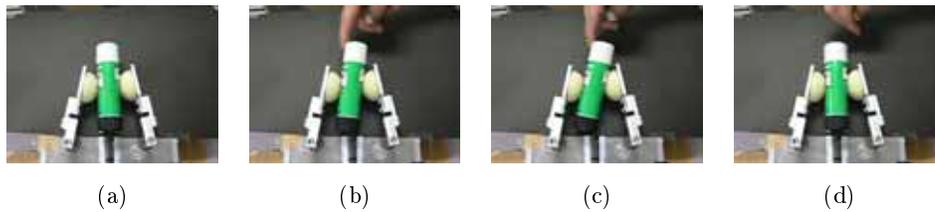


Fig.3: Pinched object rotation by external force

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对の回転指により、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、一对の回転指では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对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。

外力による把持物体の回転 物体を一对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に回転する。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-(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

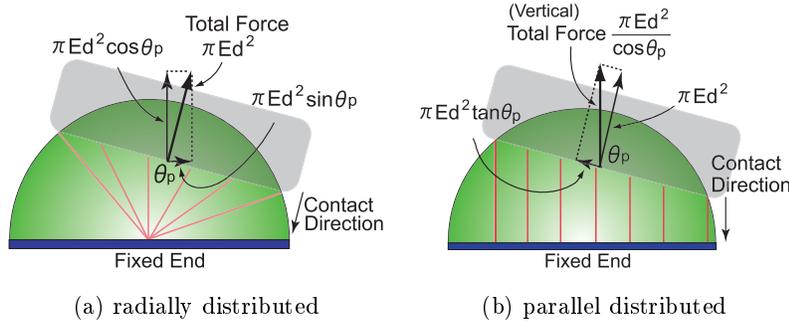


Fig.4: Fingertip models

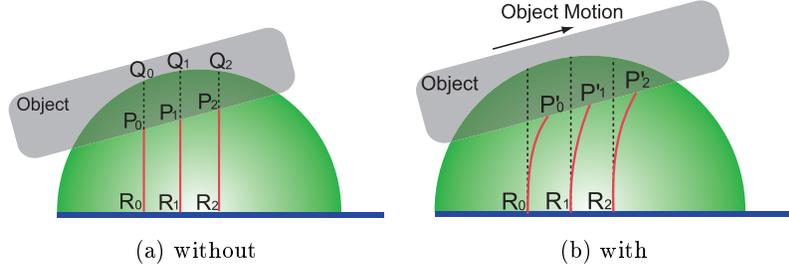


Fig.5: Tangential deformation in the parallel distributed model

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

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

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 モデル検証実験

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

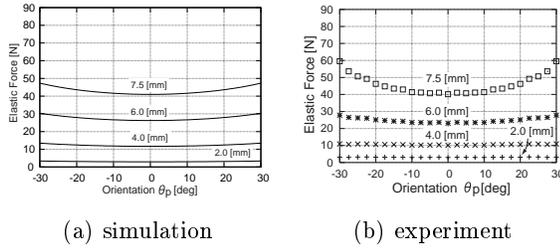


Fig.6: Simulation and experimental results

いる．ポリウレタンの引張圧縮試験を行い，ヤング率 $E = 0.232 \text{ MPa}$ 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 ダイナミクスの定式化

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ダイナミクスを定式化する．Fig. 7 に把持と操作のモデルを示す．指と物体は鉛直平面内を運動し，重力は y 軸負方向に働くと仮定する．右指は点 S まわりに，左指は点 T まわりに回転する．右指の回転角を θ_1 ，左指の回転角を θ_2 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．二指の回転軸間の距離を $2W_{fi}$ ，指の厚みを d_{fi} で表す．右指の半球柔軟指先の中心 O_1 の位置 (O_{1x}, O_{1y}) は

$$\begin{aligned} O_{1x} &= W_{fi} - L \sin \theta_1 - d_{fi} \cos \theta_1, \\ O_{1y} &= L \cos \theta_1 - d_{fi} \sin \theta_1 \end{aligned}$$

左指の半球柔軟指先の中心 O_2 の位置 (O_{2x}, O_{2y}) は

$$\begin{aligned} O_{2x} &= -W_{fi} + L \sin \theta_1 + d_{fi} \cos \theta_1, \\ O_{2y} &= L \cos \theta_1 - d_{fi} \sin \theta_1 \end{aligned}$$

と表される．一対の指が，幅 W_{obj} の長方形物体を把持する．物体の位置を (x_{obj}, y_{obj}) ，姿勢を θ_{obj} で表す．物体と右指との相対角度は $\theta_1 - \theta_{obj}$ ，物体と左指との相対角度は $\theta_2 + \theta_{obj}$ である．

右指の最大変位と接線方向変位を d_{n1} と d_{t1} で表す．これらの変位と右指の角度 θ_1 ，物体の位置 (x_{obj}, y_{obj}) ，姿勢 θ_{obj} の間には制約がある．ベクトル $G\dot{O}_1$ の最大変位方向の射影を計算すると，幾何学的な制約

$$C_1^H \triangleq -(x_{obj} - O_{1x})C_{obj} - (y_{obj} - O_{1y})S_{obj}$$

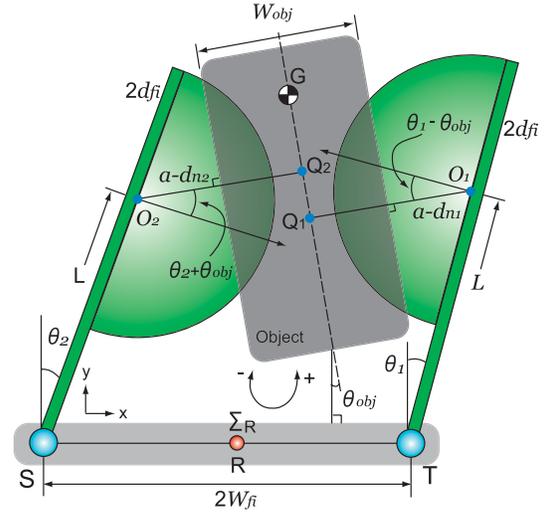


Fig.7: Simulation model

$$-(a - d_{n1}) + \frac{W_{obj}}{2} = 0 \quad (7)$$

を得る．ここで $C_{obj} = \cos \theta_{obj}$ ， $S_{obj} = \sin \theta_{obj}$ と略記した．上式はホロノミックな制約である．また，指先は滑べらないと仮定する．ベクトル $G\dot{O}_1$ の接線方向の射影は， $GQ_1 = -(x_{obj} - O_{1x}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{1y}) \cos \theta_{obj}$ で与えられる．指先の接線方向の速度と物体の接線方向の速度が一致するという条件より

$$C_1^N \triangleq G\dot{Q}_1 + a(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{obj}) + \dot{d}_{t1} = 0 \quad (8)$$

を得る．これは非ホロノミックな制約である．左指の最大変位と接線方向変位を d_{n2} と d_{t2} で表す．これらの変位と左指の角度 θ_2 ，物体の位置 (x_{obj}, y_{obj}) ，姿勢 θ_{obj} の間には制約がある．右指と同様にして，ホロノミック制約

$$\begin{aligned} C_2^H \triangleq (x_{obj} - O_{2x})C_{obj} + (y_{obj} - O_{2y})S_{obj} \\ -(a - d_{n2}) + \frac{W_{obj}}{2} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ならびに非ホロノミック制約

$$C_2^N \triangleq G\dot{Q}_2 + a(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_{obj}) + \dot{d}_{t2} = 0 \quad (10)$$

を得る．ここで $GQ_2 = -(x_{obj} - O_{2x}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{2y}) \cos \theta_{obj}$ は，ベクトル $G\dot{O}_2$ の接線方向の射影である．

一対の一自由度指による物体の把持と操作には，9 個の一般化座標がある．すなわち，物体の位置を表す x_{obj} と y_{obj} ，物体の姿勢 θ_{obj} ，二本の指の回転角度 θ_1 ならびに θ_2 ，最大変位 d_{n1} ならびに d_{n2} と接線方向変位 d_{t1} ならびに d_{t2} である．ただし，二個のホロノミック制約式 (7)(9)，二個の非ホロノミック制約式 (8)(10) が課せられている．

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．

$$T = \frac{1}{2}m_{\text{obj}}(\dot{x}_{\text{obj}}^2 + \dot{y}_{\text{obj}}^2) + \frac{1}{2}I_{\text{obj}}\dot{\theta}_{\text{obj}}^2 + \frac{1}{2}I_{\text{finger}}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{\text{finger}}\dot{\theta}_2^2. \quad (11)$$

系のポテンシャルエネルギーは，左右の指の弾性ポテンシャルエネルギーと物体の重力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．

$$U = U_{\text{parallel}}(d_{n1}, d_{t1}, \theta_1 - \theta_{\text{obj}}) + U_{\text{parallel}}(d_{n2}, d_{t2}, \theta_2 + \theta_{\text{obj}}) + m_{\text{obj}}gy_{\text{obj}}. \quad (12)$$

ここで g は重力加速度を表す．ホロノミック制約を考慮したラグランジアンは

$$\mathcal{L} = T - U + \lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H \quad (13)$$

である．ここで λ_1^H と λ_2^H はラグランジュ乗数である．非ホロノミック制約を考慮すると，9個の一般化座標に対応して以下のラグランジュの運動方程式が得られる．

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}_{\text{obj}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{\text{obj}}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{x}_{\text{obj}}} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}_{\text{obj}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_{\text{obj}}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{y}_{\text{obj}}} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_{\text{obj}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_{\text{obj}}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_{\text{obj}}} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_1} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_2} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{n1}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{d}_1} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_2} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{n2}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{d}_2} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_{1t}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{t1}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{d}_{1t}} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_{2t}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{t2}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{d}_{2t}} \{ \lambda_1^N C_1^N + \lambda_2^N C_2^N \}. \end{aligned} \quad (14)$$

ここで λ_1^N と λ_2^N はラグランジュ乗数である．

結局，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ダイナミクスは，ラグランジュの運動方程式 (14) ならびに制約式 (7)(8)(9)(10) で表される．また第3節で述べたように，柔軟な指先の弾性特性はヤング率 E で表される．指先の粘性を粘性率 c で表し，運動方程式 (14) 内の定数 E を微分作用素 $E + c d/dt$ で置き換えることにより，柔軟な指先の粘性を考慮したダイナミクスが得られる．

6 シミュレーション

ラグランジュの運動方程式 (14) を制約式 (7)(8)(9)(10) の下で解くことにより，一対の柔

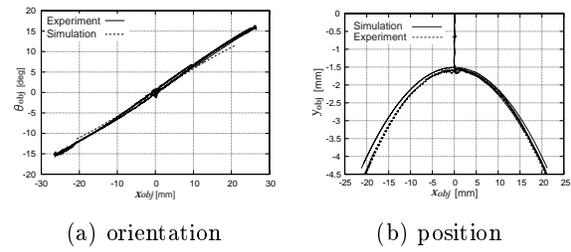


Fig.9: Comparison between simulation and experimental results

軟指による物体の把持と操作をシミュレーションすることができる．本報告では，制約安定化法 [9] により制約式を微分方程式に変換し，運動方程式に組み込む．制約安定化法により二個のホロノミック制約式 (7)(9) を以下の微分方程式に変換する．

$$\begin{aligned} \ddot{C}_1^H + 2\alpha\dot{C}_1^H + \alpha^2 C_1^H &= 0, \\ \ddot{C}_2^H + 2\alpha\dot{C}_2^H + \alpha^2 C_2^H &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

パラメータ α は十分に大きい正の定数である．制約安定化法により二個の非ホロノミック制約式 (8)(10) を以下の微分方程式に変換する．

$$\begin{aligned} \dot{C}_1^N + \beta C_1^N &= 0, \\ \dot{C}_2^N + \beta C_2^N &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

パラメータ β は十分に大きい正の定数である．

ラグランジュの運動方程式 (14)，制約安定のための微分方程式 (15)(16) は，9個の一般化座標と4個の未定乗数を未知数として含む．したがって，微分方程式の数値解法により (14)(15)(16) を解くことにより，9個の一般化座標と4個の未定乗数の値を計算することができる．そのために，一般化座標をまとめてベクトル $q = [x_{\text{obj}}, y_{\text{obj}}, \theta_{\text{obj}}, \theta_1, \theta_2, d_{n1}, d_{n2}, d_{t1}, d_{t2}]^T$ で表し，一般化速度をまとめてベクトル $p = [\dot{x}_{\text{obj}}, \dot{y}_{\text{obj}}, \dot{\theta}_{\text{obj}}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{d}_{1t}, \dot{d}_{2t}]^T$ で表す．また，ホロノミック制約に対応するラグランジュ乗数をまとめてベクトル $\lambda_H = [\lambda_1^H, \lambda_2^H]^T$ ，非ホロノミック制約に対応するラグランジュ乗数をまとめてベクトル $\lambda_N = [\lambda_1^N, \lambda_2^N]^T$ と表す．微分方程式 (14)(15)(16) に $p = \dot{q}$ を代入し， \dot{p} ，ラグランジュ乗数 λ_H ， λ_N を含む項を左辺に，それ以外の項を右辺にまとめる．ベクトル p の定義式，ラグランジュの運動方程式 (14)，ホロノミック制約の安定化のための微分方程式 (15)，非ホロノミック制約の安定化のための微分方程式 (16) をまとめて書くと

$$\begin{bmatrix} I & O & O & O \\ O & M & -\phi_H^T & -\phi_N^T \\ O & -\phi_H & O & O \\ O & -\phi_N & O & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \\ \lambda_H \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ f \\ C_H \\ C_N \end{bmatrix}$$

を得る．ここで， I は9次の単位行列， O は9次の零行列， M は一般化座標 q に依存する9次の慣性行列， ϕ_H と ϕ_N は一般化座標 q と一般化速度 p に依存する 2×9 行列である．また f ， C_H ， C_N は，一般化座標 q

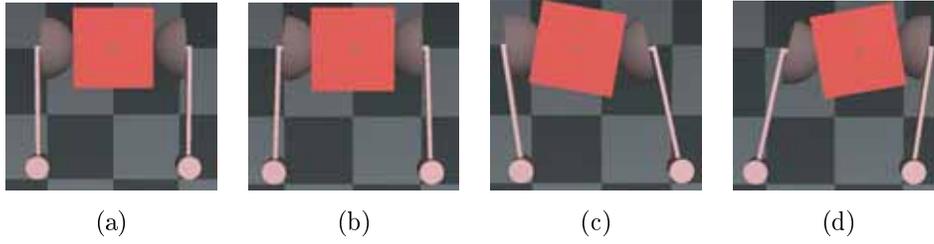


Fig.8: Simulation of posture control of grasped object

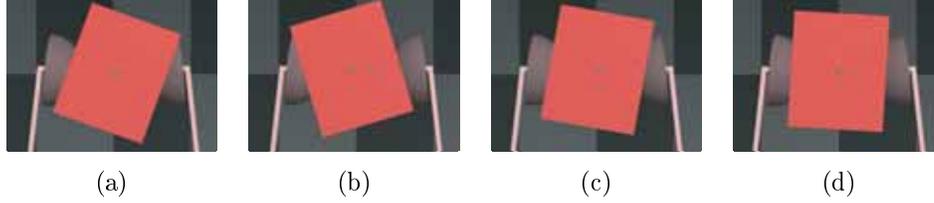


Fig.10: Simulation of pinched object rotation by external force

Table 1: Simulation parameters

a	20 mm	L	76.2 mm
E	0.232 MPa	d_{fi}	4 mm
c	300 N/(m/s)	$2W_{fi}$	97 mm
W_{obj}	49 mm	I_{finger}	125 kg·mm ²
m_{obj}	0.3 kg	α	20000
I_{obj}	125 kg·mm ²	β	10000

と一般化速度 p に依存する 9 次のベクトルである．上式左辺の行列は正則であり，上式を解くと \dot{q} , \dot{p} , λ_H , λ_N を求めることができる．以上の計算過程にルンゲクッタ法等の常微分方程式の数値解法を適用すると， q と p を計算することができる．

Fig. 8 に一対の指による物体の姿勢制御をシミュレーションした結果を示す．シミュレーションに用いたパラメータの値を Table 1 にまとめる．ヤング率の値は，第 4 節で示した値である．寸法や慣性パラメータの値は，Fig. 1 や Fig. 2 に示した実験装置における値である．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．シミュレーションと実験結果は良く一致する．Fig. 9-(b) は把持物体の軌跡を表す．シミュレーションと実験結果は良く一致している．

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．物体を把持し両指の角度を固定する．物体に外力を加えた後に解放する．Fig. 10-(a) は外力が加えられている状態，Fig. 10-(b),(c) は外力が解放された後の状態，Fig. 10-(d) は定常状態を表す．この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．

7 考察

本報告における観察とシミュレーションは，柔軟な指先を有する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証明した．把持に必要な自由度数を Table 2 にまとめる．放射状モデルを用いた解析を通して，一対の剛体指先で安定把持と姿勢制御を実現するためには，少なくとも三自由度が必要であることが報告されている．自由度が足りない場合は，物体に作用するモーメントが釣り合わないため，任意の姿勢に制御することができない．本報告では，自由度が一つ少ない一対の柔軟な指先により，物体に作用するモーメントが自然に釣り合うことを示した．すなわち，柔軟指を用いることにより，自由度が少ない単純な機構で安定把持と姿勢制御を実現できる．

本報告で提案した平行分布モデルでは，押す方向に直交する方向の変形は無視している．弾性力学では，等方な線形弾性変形がヤング率とポワソン比で定式化できることが知られている．本報告の平行分布モデルは，ポワソン比で表される変形を無視することに相当する．平行分布モデルの目的は，柔らかい指先の変形を正確に表すことではなく，柔軟指操作の力学解析を

Table 2: The number of DOFs needed

	soft fingertips	hard fingertips
grasping	1	2
grasping and posture control	2	3
model	parallel	radial

進める上で必要な指先モデルを構築することである。押す方向に直交する方向の変形は無視することにより、接触力 (2) 式、接線力 (4) 式、ポテンシャルエネルギー (3) 式を解析的に計算し、力学解析に適用することができる単純な式を得ている。指先が半球状であるため、弾性力学に基づく定式化では、これらの量は体積分を含む式により表され、力学解析に適用することは困難である。また、提案した平行分布モデルは、第2節で述べた観察結果を説明することができる。したがって、平行分布モデルは柔軟指操作の力学解析に必要で十分なモデルであると考えられる。

平行分布モデルでは、指先の弾性ポテンシャルエネルギーは指先と物体との相対姿勢に依存する。これは、柔らかい指先が半球状で、その背後に硬い板があることに起因する。この硬い板は人の爪に相当する。柔らかい指先が球状であるときは、このような依存性は表われない。一方、半球状柔軟指の背後の硬い板は指先の変形に境界条件を与えるため、相対姿勢により指先の弾性ポテンシャルエネルギーが変化する。以上の議論より、柔らかい指先と硬い爪から成る指の構造が、把持と操りにおける巧みさを高めることがわかる。

8 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。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ダイナミクスを定式化した。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。特に、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実験とシミュレーションの双方から示した。

本報告の成果は、柔軟な指先を用いることにより、硬い指先を用いる場合より少ない自由度で把持と操作を実現できることを力学的に示した点にある。柔軟な指先の長所として、面接触を実現できるので対象物になじみやすく、大きい摩擦力が得られるという点が従来から主張されていた。すなわち、柔軟な指先による把持と操作と硬い指先による把持と操作には、量的な違いがあるという主張である。本報告では、柔軟な指先と硬い指先では、ある自由度で姿勢制御が可能か否かが異なることを示した。すなわち、柔軟な指先による把持と操作と硬い指先による把持と操作は質的に異なる。また、本報告のシミュレーション結果は、柔軟指による物体の把持と操作において制御則やセンシ

ングを単純化できる可能性を示唆している。今後は、物体の把持と操作を制御の観点から解析し、柔軟指の力学的な性質を利用する単純でロバストな制御則を提案したい。また、指先の粘性を推定し、本報告で定式化した柔軟指による物体操作のダイナミクスを定量的に評価したい。

謝辞 本研究の一部は、21世紀COEプログラム「マイクロ・ナノサイエンス・集積化システム」の補助を受けた。

参考文献

- [1] Xydias, 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] Xydias, 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.
- [9] Baumgarte, J., *Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamical Systems*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 1, pp.1-16, 1972.