ロボットハンドによる物体操作のための 半球型柔軟指の静的弾性モデル*

井上 貴浩^{*1}, 平井 慎一^{*2}

Static Elastic Model of a Hemispherical Soft Fingertip for Object Manipulation by Robotic Hand

Takahiro INOUE^{*3} and Shinichi HIRAI^{*3} Science and Engineering Course, Ritsumeikan University,
1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-shi, Shiga, 525-8577 Japan

This paper proposes a new static elastic model of a hemispherical soft fingertip via a large contact deformation, which is required for handling and manipulation process of an object by means of a robotic hand. This work focuses on the formulation processes of an elastic force and its potential energy caused by the large deformation due to the contact with a planar object. These physical quantities are derived by introducing the infinite number of virtual springs inside the soft fingertip. It is firstly shown that these equations are functions of two variables: the maximum displacement of the hemispherical fingertip and the orientation angle of the object, and the elastic potential energy has a local minimum (LMEE) when the angle takes zero. Finally, we confirm the effectiveness of our elastic model by performing a compression test of the hemispherical soft fingertip.

Key Words: Robot, Modeling, Elasticity, Numerical Analysis, Finite Element Method

1. はじめに

人手による巧みで器用な物体操作を実現することを目的とした、面接触が起こり得る柔らかい材料で製作した指先を取り付けたロボットハンドによるハンドリング研究は、現在まで実験的アプローチがほとんどである。また、ハンドリングシステムの安定解析のための指先変形弾性モデルを解析的に導き議論した例は少ない。さらに、柔軟被膜を使った多指ハンドによるマニピュレーションに関する研究や人指の力学特性を利用した触覚デバイスとしての機能を探求する研究も近年増加の傾向にあるが、やはり上記同様、柔軟指による操りの容易性のメカニズムを明らかにした例はない。その原因として、接触変形モデルの導出に関する解析的アプローチの困難さが挙げられる。

横小路ら⁽¹⁾⁽²⁾は、球形状ソフトフィンガを使って接触点に生じる摩擦モーメントを利用した対象物の安定把持を実現しているが、理論解析において点接触が仮定されており、柔軟指特有の大変形を伴ったマニピュレーションを記述していない。また、前川ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、新しく開発した触覚デバイスを使って軌道追従制御を行い

把持対象物の操りに成功しているが、やはり従来どおりの点接触を仮定し指先柔軟変形に起因する弾性力は議論されていない。一方、池田ら⁽⁵⁾は、柔軟指の大変形から偏心度を定義し、滑り余裕という概念を用いて把持力制御を行っているが、弾性点接触に基づくヘルツの接触理論⁽⁶⁾によるアプローチであり、柔軟指の大変形をモデリングしたとは言えない。

面接触を考慮したハンドリング研究において、Doulgeri, 有本ら^{(7)~(10)}は、半球型柔軟指内に放射状に線形ばねを配置することで弾性力を導出し、対象物を安定に把持し操るための制御則を提案している。ここでは放射状配置によって、変形による弾性力が対象物の接触姿勢角に関わらず常に一定になる。また、長瀬ら⁽¹¹⁾は、有本らの変形モデルを発展させ指先上での転がり回転を定式化し把持動作の安定性の議論を行っているが、本稿で述べる半球型柔軟指の特徴を含んだ物理的に合理的な弾性モデルによる解析とは言えない。

一方、よりリアルな変形モデル導出に焦点をあてた研究では、FEMを用いた数値解析が挙げられる。Xydasら⁽¹²⁾は、材料力学的観点から変形モデルを導出しFE解析により半球型柔軟指の正確な変形形状を明らかにした。また、Kaoら⁽¹³⁾は、指先弾性力が指先変位量に関する累乗則であることを実験的に示し、それらがヘルツ理論の拡張であると主張した。しかし、これらの

* 原稿受付 2005年8月26日。

^{*1} 正員、立命館大学理工学研究科(☎ 525-8577 草津市野路東1-1-1)。^{*2} 正員、立命館大学理工学部。

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

論文では柔軟材料の材料学的非線形性と指先の半球形状に起因する幾何学的非線形性を区別せず、それらの影響を一つのパラメータとして定義しているため、得られた結果や誤差の原因が必ずしも明確になったとは言えない。また、モデルの複雑化により対象物のハンドリングにまでは至っていないのが現状である。さらにFE解析では、モデリング対象のメッシュの切り方によって得られる結果が異なるため、ハンドシステム全体の安定論を論じるとき、ある任意の切り方によって得たシステムの運動方程式が安定だとしても、他のパターンすべてにおいて常に安定であるとは限らない。

本稿では、柔軟指を用いたロボットハンドによる器用かつ精度の良いハンドリングを目的とした把持・操り動作の理論的解析を行うための、半球型柔軟指の解析的かつ簡潔な静的弾性モデルを提案する。そこでは、半球型柔軟指の幾何学的非線形性と材料学的非線形性を区別し、前者に焦点を当てることで、柔軟指の変形による静的弾性モデルと変形によって指先内に蓄えられる弾性ポテンシャルエネルギーの解析的な定式化を行う⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。本モデルが、指先と対象物の接触時に生じる指先変位量と接触姿勢角の2変数関数であり極小値を持つことを示し、指先の圧縮実験を行い比較・検討することで本弾性モデルの有効性を示す。

2. 半球型柔軟指静的弾性モデル

本研究では対象物把持は2指ハンドで行うものとし、その場合の指先変形による弾性力は指先垂直方向への成分が支配的であると仮定する。このとき、指先対象物間の接触を示すと図1のようになる。本論文では、ゴムなどで代表される柔軟材料の非圧縮性を採用していないため、接触による指先の体積一定変形は考慮しない。図のように半球型柔軟指内部に線形仮想ばねを垂直方向に導入し、指先の変形に基づいた指先弾性力と弾性ポテンシャルエネルギーの定式化を行い、接触する対象物の姿勢角を変数とする極小値が存在することを示す。

2.1 弾性力 図1に示したように、指先内に微小断面積 dS を持つ線形仮想ばね QR を導入し、単一仮想ばねの対象物接触方向への縮み PQ によって生じる微小弾性力を dF とする。そのときの対象物の姿勢角を θ_p 、指先最大変位量を d とし、接触面との交点 P の z 軸からの傾き角を θ 、 xy 平面上での方位角を ϕ とする。このとき、半径 a を持つ指先における縮み PQ によって生じる微小弾性力 dF は、接触平面の方程式 $x \sin \theta_p + z \cos \theta_p = a - d$ を用いて以下のように表現で

Fig. 1 Contact mechanism

きる。

$$dF = k \left\{ \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)} - \frac{a - d - x \cdot \sin \theta_p}{\cos \theta_p} \right\}. \quad (1)$$

ここで、 k は単一仮想ばね QR のばね定数に相当する。一方、線形ばねのばね定数 k は断面積 dS に比例し半球型柔軟指内での自然長 $\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}$ に反比例するから、 k_0, dS_0, L_0 をそれぞれ任意の基準寸法を持つばねのばね定数、断面積、自然長であるとする、上式は以下のように導かれる。

$$dF = E \left\{ 1 - \frac{a - d - x \cdot \sin \theta_p}{\cos \theta_p \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right\} dS. \quad (2)$$

ここで、 E は柔軟材料のヤング率を示し、式(1)における k を以下の式で置き換えた。

$$k = \frac{dS}{dS_0} \cdot \frac{L_0}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \cdot k_0 = \frac{EdS}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (3)$$

次に、式(2)を用いて変形時の指先全体での弾性力を求める。図1から分かるように、変形部の xy 平面への正射影は楕円領域になるため、全弾性力 F は以下のように表せる。

$$F(d, \theta_p) = E \iint_{ell} \varepsilon \cdot dS. \quad (4)$$

ここで、

$$\varepsilon(x, y, d, \theta_p) = 1 - \frac{a - d - x \cdot \sin \theta_p}{\cos \theta_p \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (5)$$

式(4)において記号 ell は図2-(a)に示すような楕円領域を示し、以下のような積分範囲となる。

$$A = (a - d) \sin \theta_p - \sqrt{a^2 - (a - d)^2 \cos \theta_p}, \quad (6)$$

$$B = (a - d) \sin \theta_p + \sqrt{a^2 - (a - d)^2 \cos \theta_p}, \quad (7)$$

Fig. 2 Integration area

$$b(x) = \sqrt{a^2 - (a-d)^2 - \frac{\{x - (a-d) \sin \theta_p\}^2}{\cos^2 \theta_p}}. \quad (8)$$

式(4)を解析的に解く場合、置換積分により積分範囲を円領域に変換できるが、同時に、被積分関数が楕円積分形式となり、初等関数では解析的に解くことができない。上記問題を解決するために、本モデルにおける指先変形部でのばね剛性が d のみに依存する物理量であることを数値解析により示し仮定することで、式(4)を積分範囲が円領域である解析的計算可能な式に変換する。

2.2 指先ばね剛性と弾性力の解析的計算 式(1)

を用いて指先弾性力を再記すると以下の式になる。

$$F = \iint_{ell} k \cdot PQ. \quad (9)$$

被積分関数である微小弾性力は、図3に示したように接触面に対して接線方向と法線方向に分解でき、上式は以下のように再記できる。

$$F = \iint_{ell} k \cdot \sqrt{QT^2 + PT^2} = \iint_{ell} \frac{k \cdot QT}{\cos \theta_p}. \quad (10)$$

ここで、三角形 PQT の幾何学的関係 $PT = QT \tan \theta_p$ を利用した。

Fig. 3 Decomposition of elastic force

次に、式(10)において k の2重積分で表される変形部のばね剛性は、図4(a)で示される $DABE$ 部全体での剛性に相当する。よって、式(10)よりばね定数 k のみを抽出し2重積分を行うと式(3)より、以下の式

Fig. 4 Fingertip stiffness on deformed part

Fig. 5 Stiffness in numerical simulation

を得る。

$$\iint_{ell} k = \int_A^B \int_{-b(x)}^{b(x)} \frac{EdS}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}. \quad (11)$$

上式は指先の最大変位量 d と接触対象物の姿勢角 θ_p の関数であるから、積分範囲の式(6)~(8)において d を固定し θ_p を横軸として変化させ縦軸に指先剛性をとると、図5のような数値シミュレーション結果を得る。ここで、 $\theta_p = 0$ のとき積分範囲は円領域を示し、図2-(b)のようになる。この結果は、指先変形部全体でのばね剛性が常に等しく対象物姿勢角 θ_p に依存しないことを意味する。つまり、指先最大変位量 d が等しい限り、図2-(a), (b)に示したように積分領域が変化しても、図4-(a), (b)に示した $DABE$ 部での指先剛性は常に等しい。したがって、式(10)における楕円領域を円領域に変換でき以下の式を得る。

$$F = \frac{1}{\cos \theta_p} \iint_{cir} k \cdot QT. \quad (12)$$

ここで、記号 cir は変換された積分範囲である円領域を示す。図3と図6より、変位量 QT は式(1)括弧内で $\theta_p = 0$ を代入することで以下のようにになる。

$$QT = \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)} - (a - d). \quad (13)$$

したがって、式(12)は解析的計算が可能であり図6における指先全体での弾性力に相当するため、式(3)、(13)より式(12)は以下のように再記される。

$$F = \frac{E}{\cos \theta_p} \int_{-C}^C \int_{-b(x)}^{b(x)} \Psi(x, y) dy dx. \quad (14)$$

Fig. 6 Normal contact

ここで、

$$\Psi(x, y) = 1 - \frac{a-d}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}, \quad (15)$$

$$C = \sqrt{a^2 - (a-d)^2}, \quad (16)$$

$$b(x) = \sqrt{a^2 - (a-d)^2 - x^2}. \quad (17)$$

式(16), (17)は式(6)~(8)に $\theta_p = 0$ を代入することで得られる。図6に示したように式(14)は極座標表示に変換でき、以下の式を得る。

$$F = \frac{E}{\cos \theta_p} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{a^2 - (a-d)^2}} \Psi(r) r dr d\phi. \quad (18)$$

ここで、

$$\Psi(r) = 1 - \frac{a-d}{\sqrt{a^2 - r^2}}. \quad (19)$$

式(18)において r は図6に示したように、 z 軸上の点から点 T までの接触面上の距離であり、 $d\phi$ は xy 平面上での傾き角の微小量である。以上より、図1における指先変形による弾性力は、式(18)より最終的に以下のように計算される。

$$F = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_p}. \quad (20)$$

上式により、半球型柔軟指が対象物と垂直方向に接触することにより現れる指先全体での弾性力の大きさが、最大変位量の2乗に比例し対象物姿勢角の余弦に反比例することが明らかになる。つまり、指先弾性力は最大変位量 d と対象物姿勢角 θ_p の2変数関数であることが理解できる。本稿では、より簡潔で物理的かつ数学的に合理的なモデルの導出を目的とし、また今後のハンドリング解析を行うために線形ばねを指先内に導入し線形ヤング率を採用した。よって、材料学的観点からは線形モデルであると言える。一方、式(20)

で表される非線形性は柔軟指の半球形状に起因する特性である。この幾何学的非線形性によって、弾性力の大きさには極小値が存在することが示された。この結果は、次節で述べる指先変形による弾性ポテンシャルエネルギーにおいて明確に現れる。

2.3 弾性ポテンシャルエネルギー 式(10)と同様に、図3において単一仮想ばね QR が PQ 縮むことにより生じる指先全体での弾性エネルギーは、以下のように表せる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \iint_{ell} k \cdot (QT^2 + PT^2) \\ &= \frac{1}{2 \cos^2 \theta_p} \iint_{ell} k \cdot QT^2. \end{aligned} \quad (21)$$

前節と同様に、対象物姿勢角の変化に対するばね剛性の不変性を考慮すると、積分範囲を楕円から円領域に変換でき上式は以下のように再記できる。

$$P = \frac{1}{2 \cos^2 \theta_p} \iint_{cir} k \cdot QT^2. \quad (22)$$

したがって、前節と同様に式(3), (13)より解析的計算可能な以下の式を得る。

$$P = \frac{E}{2 \cos^2 \theta_p} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{a^2 - (a-d)^2}} \Phi(r) r dr d\phi. \quad (23)$$

ここで、

$$\Phi(r) = \sqrt{a^2 - r^2} - 2(a-d) + \frac{(a-d)^2}{\sqrt{a^2 - r^2}}. \quad (24)$$

よって、式(21)は最終的に次式のような簡潔な式になる。

$$P = \frac{\pi E d^3}{3 \cos^2 \theta_p}. \quad (25)$$

上式で示される柔軟指の変形による弾性ポテンシャルエネルギーは、指先最大変位量の3乗に比例し対象物姿勢角の余弦の2乗に反比例するスカラー量である。また、弾性力と同様、姿勢角がゼロのときに極小値 (Local Minimum of Elastic Potential Energy, 以下では LMEE と呼ぶ) が現れ、弾性エネルギーの対象物姿勢角に対する変化率は弾性力のそれよりも大きい。ここで、式(25)を最大変位量 d で偏微分しても式(20)と等しくならないことに注意されたい。式(25)の d による偏微分量は、図1における d 方向への弾性力であり、式(20)を $1/\cos \theta_p$ 倍した値になる。一方、姿勢角がゼロのときの接触では、式(20)と式(25)の d による偏微分量は互いに等しくなることは明らかである。

2.4 Hertz の接触理論との比較 任意の曲面を持つ弾性物体間の接触理論は、1881年 Hertz によって

示された．半径 R を持つ弾性体球とヤング率無限大を仮定した剛体平面との接触による垂直抗力 F は，以下のような近似式で表される⁽⁶⁾．

$$F = \frac{4\sqrt{R}}{3} \left(\frac{E}{1-\sigma^2} \right) d^{\frac{3}{2}}. \quad (26)$$

ここで， E は弾性体球のヤング率， σ はポアソン比， d は弾性体球の変位量を表す．上式は実用上有益であるため，車輪とレール，ロールと圧延材，軸受とベアリングの間に発生する接触応力を求めるのに広く利用されている．しかし，Hertz の接触理論での二つの接触物体は，任意の曲率半径を有する楕円放物面であり，球や円筒，半球のような閉曲面ではないため，接触面の反対側は半空間として記述されており境界を定義していない．また，微小変形に限られているため，ゴムや生体組織等，ヤング率が非線形性を示す材料には，式 (26) を適用できない．

Kao ら⁽¹³⁾は，材料学的非線形性と幾何学的非線形性を含むパラメータ c_d を定義し，式 (26) を以下のように変換している．

$$F = c_d d^{\zeta}. \quad (27)$$

さらに，半球状柔軟指の垂直方向接触実験を行い，重み付け最小二乗法により，指先変形が 20% 以下と 20% 以上に分類し ζ を推定している．前者では $\zeta \approx 1.75$ ，後者では $\zeta \approx 2.3$ が実験的に求められている．以上のように，ゴムやシリコンゴムのような柔軟物では微小変形であっても線形とは言えず，球形状に起因する非線形性も加わり Hertz の接触理論を適用できない．すなわち，式 (27) における $\zeta = 1.5$ を満足することができない．

また，Hertz 理論には対象物の接触角という概念がないため垂直接触のような単純な接触形態には対応できるが，任意の姿勢角を持つ接触や転がり接触を定義することができない．一方，本稿で導出した弾性力式は接触する対象物の姿勢角を持つため，多様な接触パターンが想定されるロボットハンドによる把持・操り動作の解析に利用することができる．

3. ヤング率の計測

本稿では図 7 に示すように，ポリウレタン樹脂で製作した寸法の異なる 6 種類の試験片を圧縮することで，同材料で製作する柔軟指のヤング率を求める．本計測実験において，15, 20, 25 mm の高さを持ちそれぞれに対して，直径 20, 30 mm のサイズの円筒型ポリウレタンゴムを用意した．

計測結果の応力-歪線図の全体を図 8-(a) に，拡大図を図 8-(b) に示す．図内に記述した数値は，左列に

Fig. 7 Specimens for compression test

(a) Stress strain diagram (b) Enlarged diagram

Fig. 8 Stress strain diagram of polyurethane rubber

おいて試験片高さを，右列においては試験片直径を示す．本稿では図 9 に示すように，得られた計測結果より平均値を求め最小二乗法によりヤング率曲線を得た．本研究の目的は柔軟指を取り付けたロボットハンドによる対象物の把持・操りであり，対象物把持時の指先の最大変位は 50 % 程度の圧縮を想定している．また，前述したように半球型柔軟指の幾何学的非線形性に焦点を当てるため，柔軟材料におけるヤング率の材料学的非線形性の議論は避け，求めたヤング率曲線において 50 % までを線形近似することにより，ヤング率約 203.2 kPa を得た．

Fig. 9 Average value of stress strain diagram

4. 圧縮実験

本稿では，ポリウレタン樹脂で製作した半球型柔軟指を図 1 に示したような垂直方向に圧縮することで，式 (20) で表された指先変形による弾性力モデルの妥当性を検証する．また，接触角度を変化させ圧縮を行うことで，指先大変形による弾性力の大きさに極小値

が存在することを実証する。

Fig. 10 Compression test

本実験で使用する柔軟指の直径は 40 mm で 13 通りの傾きロッドにより、図 10 に示したような圧縮試験を行う。また、接触部の傾き角が 0 deg ~ 30 deg までの 2.5 deg 刻みのロッドを用意し、約 8 mm もしくは 9 mm までの圧縮を行った。図 11 に実験結果を示す。図において横軸は、指先を垂直方向に圧縮したときの図 1 における指先最大変位量 d である。縦軸は、圧縮時の弾性力を指先下部のロードセルにより計測した値である。

すべての図において、およそ $d = 6.0$ mm まではほぼ一致した結果となるが、 $d = 6.0$ mm を過ぎると誤差が生じている。これは、指先が圧縮され変形することによってラテラルな方向へも変形を生じ、図 1 での主軸以外の方向に関するばね剛性により、 z 方向への弾性力が增大するためであると考えられる。

次に、シミュレーション結果と実験結果をそれぞれまとめると図 12-(a) と図 13-(a) が得られる。また、最大変位量が 7 mm から 8 mm までの拡大結果を図 12-(b) と図 13-(b) に示す。図内の数値は対象物の姿勢角（ロッドの傾き角）を示し、5 deg 刻みの結果を表示している。それぞれの (b) 図より、指先最大変位量が等しいと対象物の姿勢角の増大につれて弾性力は大きくなることが分かる。また、同様の現象を確認するために、式 (20) における対象物姿勢角 θ_0 を横軸にとりプロットすると、図 14 を得る。図内の数値は指先最大変位量 d を示す。実験結果において 0 deg 付近で明らかに極小値が存在し、弾性力の変化率の増加は最大変位量が大きいときに顕著に現れている。シミュレーションにおいても同様の結果が得られ、本稿で提案した指先内部に垂直方向の線形仮想ばねを導入した簡単な弾性モデルでも弾性力の大きさの極小値を表すことができることを示している。一方、最大変位量が大きいときに誤差を生じている。これは、ヤング率を歪に関する非線形関数として定義し材料学的非線形性を含んだモデルを導出することで解消される。本稿では、幾何学

Fig. 11 Elastic forces in experiments

的非線形性に焦点を当てているため、両非線形性を含んだモデルの導出は今後の議論とする。今後のロボットハンドによる把持・操り理論の展開において、本弾性力式や LMEE の概念を利用することによって、対象物の安定把持と姿勢制御を最小自由度の 2 指ハンドで実現でき、簡潔な制御系設計が可能になると期待さ

Fig. 12 Simulation results of elastic force

Fig. 13 Experimental results of elastic force

Fig. 14 Local minimum of elastic force

れる。

5. おわりに

本稿では、半球型柔軟指内部に縦方向に線形ばねを配置することで、静的弾性モデルならびに弾性ポテンシャルエネルギーの定式化を行った。また、LMEEが存在することを理論的に示し、実験により弾性力の大きさに極小値が存在することを確認した。今後は、ゴムなどのエラストマーにおける体積一定変形を考慮することで、指先のラテラルな方向への変形の効果も取り入れ、ヤング率の非線形性を含んだモデルの導出を行う。

本稿で導出した LMEE の概念を用いることで、次稿以降でハンドリングのための最小自由度を有する 2 指回転関節ハンドによる準静的把持・操りアルゴリズムを紹介する。

文 献

(1) Yokokohji, Y. et al., Frictional Spin Moment Compensation at Contact Points for Object Manipulation by a Multifingered Hand with Soft Fingertips, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.17, No.6, (1999), pp.876-886.

(2) Yokokohji, Y. et al., Vision-Aided Pose Estimation of an Object Manipulated by a Multifingered Hand, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.18, No.3, (2000), pp.401-410.

(3) Mackawa, H. et al., Dynamic Grasping Force Control Using Tactile Feedback for Grasp of Multifingered Hand, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, Vol.32, No.11, (1996), pp.1526-1534.

(4) Mackawa, H., Grasp and Manipulation by a Multifingered Hand Using Tactile Information, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.18, No.6, (2000), pp.18-23.

(5) Ikeda, A. et al., Grip Force Control of the Elastic Body based on Contact Surface Eccentricity During the Incipient Slip, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.23, No.3, (2005), pp.337-343.

(6) J.L.Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Chapter 4, (1985)

(7) Z.Doulgeri, et. al., Feedback Control for Object Manipulation by a pair of Soft Tip Fingers, *Robotica*, Vol.20, (2002), pp.1-11.

(8) Z.Doulgeri and J.Fasoulas, Grasping Control of Rolling Manipulation with Deformable Fingertips, *Transactions of the IEEE/ASME on Mechatronics*, Vol.8, No.2, (2003), pp.283-286.

(9) A.Nguyen and Arimoto, S., Performance of Pinching Motions of Two Multi-DOF Robotic Fingers with Soft-Tips, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2001), pp.2344-2349.

(10) Arimoto, S. et al., Dynamics and Control of a set of Dual Fingers with Soft Tips, *Robotica*, Vol.18, (2000), pp.71-80.

(11) Nagase, K. et al., Control of Grasping and Manipulation of an Object with Soft Finger-tips, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, Vol.40, No.5, (2004), pp.518-527.

(12) N.Xydas, et. al., Study of Soft-Finger Contact Mechanics Using Finite Elements Analysis and Experiments, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2000), pp.2179-2184.

(13) I.Kao and F.Yang, Stiffness and Contact Mechanics for Soft Fingers in Grasping and Manipulation, *Transactions of the IEEE on Robotics and Automation*, Vol.20, No.1, (2004), pp.132-135.

(14) Inoue, T. and Hirai, S., Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2003), pp.2654-2659.

(15) Inoue, T. and Hirai, S., Local Minimum of Elastic Potential Energy on Hemispherical Soft Fingertip, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2005), pp.2319-2324.