

柔軟指ハンドを用いた把持力制御における安定性と把持可能性の解析

Analysis of Stability and Graspability for Grasping Control with Soft-fingered Hand

柴田 瑞穂 平井 慎一

立命館大学ロボティクス学科

Mizuho SHIBATA, Shinichi HIRAI

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract: This paper describes a stability and graspability analysis in grasping task, taking fingertip dynamics into consideration. First, a soft-fingered grasping task is modeled and formulated. A stability analysis is presented using formulated equations. We also show that grasping force converges to a constant value that is independent of fingertip dynamics. Using a soft-fingered hand mechanism that we built, we confirm that grasping force can easily be regulated by controlling saturated P. Second, through simulation, we verify the effect of fingertip dynamics on sampling time. We investigate the dependency of fingertip dynamics and sampling time on graspability.

Keywords: Graping, Soft fingertip dynamics, Graspability, Grasping force control, Soft-fingered hand

1 緒言

ロボットハンドの研究は、古くから多くの研究がなされている。これら多くの研究では、指先と把持物体を剛体と仮定し、その接触は点接触としている [1], [2]。これらの仮定は静的な解析には有用であるが、実際の物体把持や操作においては成り立たない場合が多い。人間の指先は柔軟であり、その柔軟性が安定な把持を実現している。柔軟指は把持の過程で変形し、その結果、接触は面接触となる。また、指先の動特性も安定な把持に寄与していると考えられる。Arimotoらは柔軟指を有するハンドを利用してピンチング動作を行った [3], [4], [5]。彼らは安定把持と位置制御を同時に行う制御則を提案し、受動性を用いてその安定性を検証した。しかし、彼らは柔軟指の動特性は考慮していない。

そこで本論文では、把持動作において指先の動特性の影響を検証する。柔軟指を有するハンドの挙動をモデル化し、制御則としてP制御を用いた場合の把持動作について、リアプノフ関数を用いて安定性を解析する。解析から、この把持動作では指先の動特性の値によらず、目標の把持力に収束することが導かれた。この現象を実際に構築した把持力制御システムを用いて確認する。次に、把持力制御をシミュレーションを用いて、離散的に解析を行った。ここでは、指先の動特性およびゲインと把持が維持できるサンプリングタイムとの関係を検証する。

2 動作設定

この章では、柔軟指を有するロボットハンドを使用した把持動作を表現する。まず、指先の動特性を考慮した把持動作を定義する。この柔軟指ハンドが物体を把持する維持できる状態を、把持可能性と呼ぶことにする。次に、この把持動作をモデル化する。そのとき、指先の動特性が非線形の剛性と粘性を有すると仮定する。

2.1 把持の定義

この章では、柔軟指を用いた把持を式で表現する。また、その式を用いて把持可能性を表現する。簡単のため、ハンドは各指とも独立に直動する2指ハンドを対象とする。

Fig.1に柔軟な指先を有する2指ハンドで剛体を把持する様子を示す。ここで、 $f_i(t)$, $v_i(t)$ はそれぞれ*i*番目の指に時刻*t*に発生する把持力と速度である。柔軟指を有する把持動作は、以下の式で定義する。

$$f_i(t) (> 0; \forall t) \rightarrow f_d \pm \varepsilon_f \quad (i = 1, 2; t \rightarrow \infty), \quad (1)$$

$$|v_1(t)| - |v_2(t)| \leq \varepsilon_v \quad (t \rightarrow \infty). \quad (2)$$

ここで、 ε_f , ε_v はそれぞれ速度マージンと力マージンを表す。式(1)は、把持力が ε_f の幅を持って目標力 f_d に収束することを表している。指先に動特性が存在するため、把持物体は振動する可能性がある。そこで、力マージン ε_f を導入する。また、把持力 $f_i(t)$ は把持を維持するためにはすべての時刻*t*において正の値でなければならない。式(2)は二本の指の間に ε_v の幅で相対速度が存在してもよいことを意味している。把持の種類には大きくわけてスライディング動作とピンチング動作がある。スライディング動作は把持力を変化させず物体を動かす動作である。ピンチング動作は物体を動かさずに把持力を変化させる動作である。この2つの動作をFig.2に示す。式(1), (2)はこの2つの動作をどちらも表現している。この状態では、柔軟指ハンドが物体を把持し続けることが可能である。いいかえれば、把持力を制御することによって、把持を維持することができる。この状態を把持可能性と定義する。ここからは把持力制御の観点から、柔軟指ハンドを用いたピンチング動作を検証する。

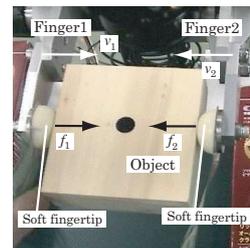


Fig.1: Grasping by soft-fingered hand

2.2 柔軟指把持のモデル化

この章では、把持を解析するために動的なモデルを立てる。まず、柔軟指ハンドを用いた把持動作を定式化する。簡単のために、把持する物体は静止し続けると仮定する。つまり、式(2)において、すべての時刻*t*で $\varepsilon_v = 0$ が満たされると仮定する。また、それぞれの指先の特性が同じであることも仮定する。そこで、Fig.3のような簡略化したモデルを考える。柔軟指はマスと非線形のバネとダンパーから構成されるとする。ここで、バネとダンパーは指先の動特性を表し、マスは指と指先の質量を合わせたものとする。 $x(t)$ は時刻*t*における指の位置を表す。初期状態として、 $t = 0$ のときに $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$ を満

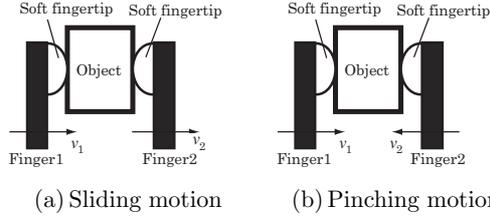


Fig.2: Grasping motion

足すとする． $x(t)$ はバネの縮む方向を正とする．指の質量，非線形のバネを表す関数，非線形のダンパーを表す関数を，それぞれ m , $K(x)$, $D(\dot{x})$ とする．これらの関数は， $t = 0$ において $K(0) = 0$, $D(0) = 0$ を満足とする．また， $K(x)$ と $D(\dot{x})$ は，それぞれ x と \dot{x} に対して狭義単調増加関数であると仮定する．これらの仮定は実際の柔軟な材質と照らし合わせても妥当なものである．柔軟指からマスに働く外力を $F(t)$ とする．また， f_{drive} を指のアクチュエータからマスに働く駆動力とする．Fig.3 から，運動方程式は以下の式で表される．

$$m\ddot{x}(t) = f_{drive} - F(t). \quad (3)$$

外力 $F(t)$ は $K(x)$ と $D(\dot{x})$ によって発生し，

$$F(t) = K(x) + D(\dot{x}) \quad (4)$$

と表現される．ここからは，これらの式を用いて把持力制御を解析する．制御則として P 制御を用いる．外力 $F(t)$ は力センサを用いて計測し，この計測した力を $f(t)$ とする．式 (3), (4) に基づいて，運動方程式は以下の式で表現される．

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = K_f(f_d - f(t)) - K(x) - D(\dot{x}) \\ f(t) = K(x) + D(\dot{x}). \end{cases} \quad (5)$$

ここで， K_f は力フィードバックゲインである．

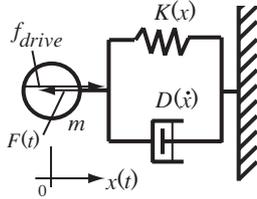


Fig.3: Simplified soft-fingered model

3 安定性

この章では，柔軟指を用いた物体操作の安定性を議論する．まず，運動方程式が安定であることをリアプノフ関数を用いて証明する．その解析から，把持力が指先の動特性によらず一定の値に収束することを導く．また，この解析を実機によって確認する．

3.1 安定性の解析

式 (5) が安定ならば， $\dot{x} = 0$, $\ddot{x} = 0$ が成り立つと仮定できる．これらの仮定と式 (5) に基づき，把持力 f は以下のように計算される．

$$f = K(x_e) = \frac{K_f}{K_f + 1} f_d. \quad (6)$$

ここで， x_e は安定条件における平衡点である． $K(x)$ は x に対して狭義単調増加関数であるため， x_e は一意に決まる．ここで，状態変数 y_1, y_2 を

$$\begin{cases} y_1 = x - x_e \\ y_2 = \dot{x}, \end{cases} \quad (7)$$

と定義すると，状態方程式は次の式で表される．

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{m} \{ K_f f_d - (K_f + 1)K(y_1 + x_e) - (K_f + 1)D(y_2) \}. \end{cases} \quad (8)$$

ここで，リアプノフ関数の候補として次のスカラー関数を用いる．

$$V(y_1, y_2) = \int_{x_e}^{y_1 + x_e} K(\tau) d\tau - y_1 K(x_e) + \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{K_f + 1} y_2^2. \quad (9)$$

この式の第 1 項と第 2 項は復元力によって生じる，平衡点からのポテンシャルエネルギーを意味している．これは，Fig.4 の斜線の部分に相当する．また，第 3 項は運動エネルギーを意味している．したがって， $V(y_1, y_2)$ は正定である．ここで， $\dot{V}(y_1, y_2)$ は，

$$\begin{aligned} \dot{V}(y_1, y_2) &= \dot{y}_1 K(y_1 + x_e) - \dot{y}_1 K(x_e) + y_2 \dot{y}_2 \frac{m}{K_f + 1} \\ &= -y_2 D(y_2) \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

となり，準負定である． $\dot{V}(y_1, y_2)$ が時刻 t_1 で 0 になったと仮定すると， y_2 は時刻 t_1 以降，0 でなければならない．この仮定を用いると， $y_2 = 0$ が成り立つ必要がある．このとき，

$$y_2 = \frac{1}{m} \{ K_f f_d - (K_f + 1)K(y_1 + x_e) \} \quad (11)$$

であるので， y_1 も時刻 t_1 以降の時刻では 0 でなければならない．したがって， $\dot{V}(y_1, y_2)$ は原点以外で恒等的に 0 になることはない．ゆえに，この方程式は原点において漸近安定である．この解析から，把持力 f が $K(x_e)$ に収束することが導かれる．式 (6) より，把持力は指先の動特性によらず一定の値に収束する．

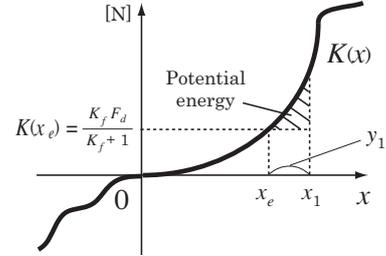


Fig.4: Potential energy from stable position in $K(x)$

3.2 実験による検証

この章では，実機を用いて把持力が指先の動特性によらず一定の値に収束することを確認する．Fig.5 に開発した柔軟指を有するハンドシステムの外観とシステム図を示す．2 指ハンドとして，(株)NKE 製の SK-CH-2 を利用した．このハンドはそれぞれの指が 1 自由度の直動ジョイントから構成されている．したがって，ハンドとしては 2 自由度を有する．アクチュエータとしては，DC モーターを使用している．柔軟指を使用しているので，把持力は分布した力となって発生する．そこで，力センサとして，(株)NITTA 製のタクタイルセンサ I-SCAN を使用した．このタクタイルセンサは分布力を計測するためにそれぞれの指先の根元に配置した．つまり，タクタイルセンサは剛体の指と柔軟指の間に貼り付けた．このセンサはセルと呼ばれる計測点が 100 点分布している．それぞれの指に加わる把持力は，それぞれのセンサセルの値を合計することで求められる．タクタイルセンサのサンプリングタイムは A/D 変換を含めて 2.5[msec] である．柔軟な指先に使用する材質として，ポリウ

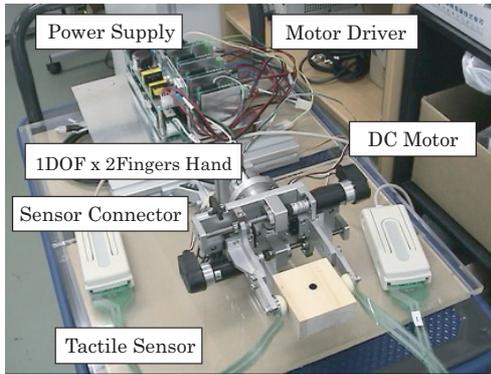
レタンを選択し、指先の形は半球形にした．半球形の指先では、発生力は以下の式で表される．

$$F(t) = \pi E d_0^2. \quad (12)$$

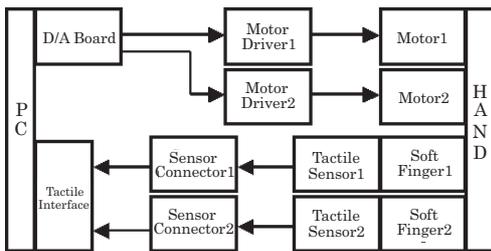
ここで、 E は材質のヤング率、 d_0 は垂直に押した場合の指先の最大変位量である [6]．式 (12) から、 $F(t)$ は $x(t)$ の 2 乗に比例することがわかる．モーターには発生トルクに限界があるので、実験では制御則として飽和 P 制御を用いた．この制御則は、

$$f_{drive} = \begin{cases} f_{max} & (f_d - f(t) > f_{max}) \\ -f_{max} & (f_d - f(t) < -f_{max}) \\ K_f(f_d - f(t)) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

と表現することができる．ここで、 f_{drive} はアクチュエータが発生する駆動力、 K_f は力フィードバックゲイン、 f_d は目標把持力、 $f(t)$ は時刻 t に力センサによって計測される把持力である．また、 f_{max} あらかじめ決められる、最大把持力である．最大把持力 f_{max} は指のアクチュエータによって決定されるパラメータである．Fig.6 に、実際に式 (13) の制御則を用いて実験を行った場合の把持力の推移を示す．ここで、目標把持力は $f_d = 1.1$ [N]、ゲインは $K_f = 500$ と与えた．Fig.6 から、高いゲインを用いた結果、把持力 $f(t)$ が目標把持力 f_d に収束していることが確認できる．タクトイルセンサにノイズがあるため、カマージン ε_f は 0.5 [N] となった．



(a) Overview



(b) System flowchart

Fig.5: Soft-fingered hand system

4 離散解析

ここまでは連続系で安定性の解析を行った．しかしながら、実際のシステムは、あるサンプリングタイムで駆動される．使用するセンサの制約上、どれくらいのサンプリングタイムでセンサ情報をフィードバックすれば、制御が安定になるかということを知ることは非常に重要なことである．アクチュエータは短いサンプリングタイムでも駆動が可能であるが、センサのサンプリングタイムはコストの面からも短くすることが困難である．そこでこの章では、把持可能性を離散的に解析する．まず、シミュレーションを用いて、あるサンプリングタイムにおいて指先の動特性やゲインを変化させた場合にハンドが把持を継続できるかどうかを検証する．

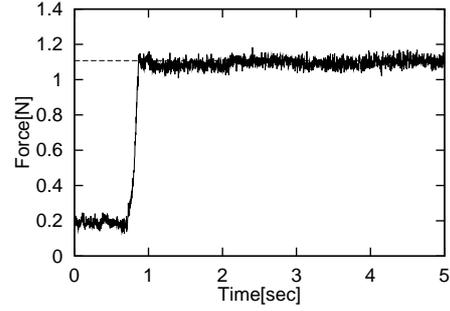


Fig.6: Grasping force ($F_d = 1.1$ [N], $K_f = 500$)

4.1 シミュレーション結果

簡単のため、指先の動特性を線形の関数で次のようにおく．

$$K(x) = kx(t), \quad (14)$$

$$D(\dot{x}) = b\dot{x}(t). \quad (15)$$

ここで k と b はそれぞれ弾性係数と粘性係数を表す． T はコントローラのサンプリングタイムである．式 (5), (14), (15) から、離散系での運動方程式は以下ようになる．

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = K_f(f_d - f(t)) \\ \quad -kx\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right) - b\dot{x}\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right) \\ f(t) = kx\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right) + b\dot{x}\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right). \end{cases} \quad (16)$$

式 (16) をルンゲクッタ法を用いて数値的に解いた．ルンゲクッタ法の刻み幅は 0.1 [ms] とした．シミュレーションでは、 $f(t)$ は 0 より小さくなくても、目標の把持力に収束することがある．しかし、 $f(t)$ が 0 より小さい場合では、把持を維持することはできない．そこで、 $f(t)$ が 0 以下になるかどうかを検証することで、把持が維持できているかどうかを検証することにする．このシミュレーションでは、サンプリングタイムに対する指先の動特性とゲインの影響を検証した．ここで、マスと目標把持力はそれぞれ $m = 0.11$ [kg]、 $f_d = 1.1$ [N] とする．

4.1.1 サンプリングタイムに対する剛性の影響

シミュレーションによって、把持可能性における剛性 k の影響を検証する．Fig.7 にシミュレーション結果を示す．横軸と縦軸はそれぞれ剛性と時間を表している．それぞれの (k, T) の組に対して、 $f(t) < 0$ が起こりうるかどうかを検証した．このとき、ゲインは $K_f = 10$ と設定した．Fig.7 の曲線は、把持可能性の観点から、把持が維持できるかどうかの境界のサンプリングタイムの値を線で結んでいる．この曲線より上の領域では物体は把持不可能となる．なぜなら、この領域における (k, T) の組では、 $f(t)$ がどこかの時刻で 0 より小さな値になってしまうからである．Fig.7 では、 $b = 1.0$ [Ns/m] と $b = 2.0$ [Ns/m] の場合のグラフを示している．

この結果より、把持が可能である境界のサンプリングタイムは k が大きくなるにつれて小さくなっていくことがわかる．これは柔軟指を使用すればハンドが把持状態を容易に維持できることを示唆している． $b = 1.0$ [Ns/m] のグラフと $b = 2.0$ [Ns/m] のグラフが交差していることは、把持可能性の粘性の影響における境界のサンプリングタイムが、単調に減少する傾向ではないことを示している．この現象は次の節で詳しく議論する．

4.1.2 サンプリングタイムに対する粘性の影響

ここでは、把持可能性における粘性 b の影響を検証する．Fig.8 にシミュレーション結果を示す．横軸と縦軸はそれぞれ粘性と時間を表している．それぞれの (b, T) の組に対して、 $f(t) < 0$ が起こりうるかどうかを検証した．このとき、ゲインは $K_f = 10$ と設定した．ここでも、把持可能性の観点から、

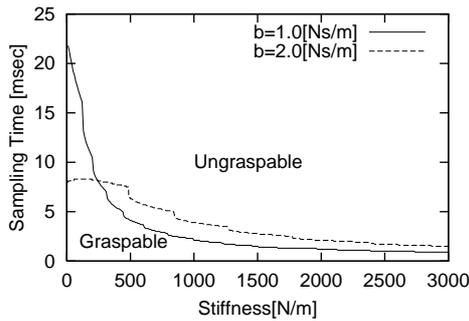


Fig.7: Boundary sampling time for (k, T) pair ($K_f = 10$)

把持が維持できるかどうかの境界のサンプリングタイムの値を線で結んだ。この曲線より上の領域では物体は把持不可能となる。Fig.8では、 $k = 2000$ [N/m] と $k = 20000$ [N/m] の場合のグラフを示している。

この結果から、ある粘性係数までは境界のサンプリングタイムの値が増加していることが確認できる。例えば、 $k = 2000$ [N/m] のグラフでは $b = 4.04$ [Ns/m] でピーク値を持ち、 $k = 20000$ [N/m] のグラフでは $b = 12.81$ [Ns/m] でピーク値を持っている。このピーク値は先ほどの剛性とサンプリングタイムの関係における、2つのグラフが交差している現象と対をなす現象である。また、ピークを示す粘性係数の値は剛性が高くなることによって増加することも確認できる。この現象は、柔軟指ハンドが十分に高い粘性係数でも長いサンプリングタイムで把持が可能であることを示唆している。一般に剛体とみなせる金属のような物体は剛性の値が高く、粘性の値は低い。よって、この現象は柔軟指ハンドを用いた把持に特有の現象であると考えられる。この現象は指先に適切な材質を利用することによって、長いサンプリングタイムで把持が可能であるということを示唆している。

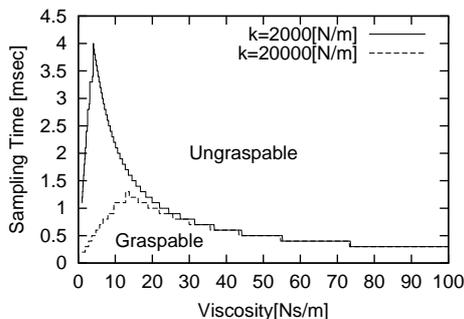


Fig.8: Boundary sampling time for (b, T) pair ($K_f = 10$)

4.1.3 サンプリングタイムに対するゲインの影響

この節では、把持可能性におけるゲイン K_f の影響を検証する。Fig.9にシミュレーション結果を示す。横軸と縦軸はそれぞれゲインと時間を表している。それぞれの (K_f, T) の組に対して、 $f(t) < 0$ が起こりうるかどうかを検証した。このとき、剛性と粘性はそれぞれ、 $k = 2500$ [N/m]、 $b = 1.0$ [Ns/m] と設定した。ここでも、把持可能性の観点から、把持が維持できるかどうかの境界のサンプリングタイムの値を線で結んだ。この曲線より上の領域では物体は把持不可能である。Fig.9では、 $k = 2000$ [N/m] と $k = 20000$ [N/m] の場合のグラフを示している。

この結果より、把持が可能である境界のサンプリングタイムは K_f が大きくなるにつれて小さくなっていくことがわかる。ここで、 $K_f \leq 2$ の領域では長いサンプリングタイムで把持が

可能であることがわかる。しかし、低いゲインを使用すると、式(6)から収束する把持力が目標力と比べて小さくなってしまふ。また、整定時間も遅くなる。さらに、Fig.9から、 $K_f > 2$ の領域では把持可能性におけるゲインの影響はほとんど変わらないことがわかる。よって、ゲインは十分に高く設定すべきであるといえる。

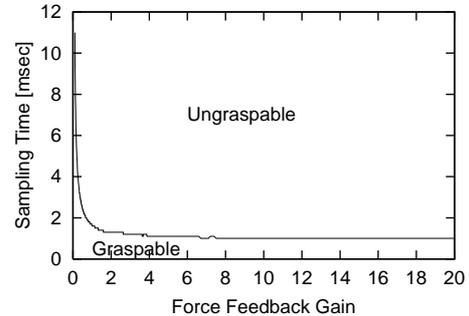


Fig.9: Boundary sampling time for (K_f, T) pair ($k = 2500$ [N/m], $b = 1.0$ [Ns/m])

5 結言

本論文では、指先の動特性を考慮した把持動作について理論、実験の両面から検証を行った。まず、柔軟指の動特性を考慮した把持動作を定式化し、柔軟指を有するハンドが把持を行う能力を把持可能性として定義した。また、ハンドをモデル化し、特に把持動作中のピンチング動作について定式化した。ここで、指の動特性は非線形のパネとダンパーと表現できると仮定した。これらの仮定と式を用いて解析を行った結果、P制御を用いた把持力制御を行った場合、指先の動特性によらず一定の把持力に収束することが導かれた。また、この解析を実機を用いて確認した。次に、シミュレーションを用いて離散解析を行った。このシミュレーションから特に、ある粘性係数までは把持可能なサンプリングタイムが増加するという傾向を得た。この傾向は柔軟指特有の現象であると考えられる。これらの結果より、柔軟指を有するロボットハンドを使用すれば、長いサンプリングタイムで把持が可能であることがわかった。

今後の課題としては、理論的な解析および、離散系での解析の実機による検証などがあげられる。この研究により、柔軟指を有する把持動作において適切な材質を選ぶ指針が確立されることが期待される。

参考文献

- [1] V. Nguyen, "Constructing Force-Closure Grasps in 3D", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.240-245, 1987.
- [2] T. Yoshikawa, K. Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Multifingered Robot Hands", *IEEE Tras. on Robotics and Automation*, Vol7-1, pp.67-77, 1991.
- [3] Z. Doulgeri and S. Arimoto, "A force control for a robot finger under kinematic uncertainties", *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1475-1480, 1999.
- [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, No. 1, pp. 71-80, 2000.
- [5] S. Arimoto, Z. Doulgeri, P.T.A. Nguyen, and J. Fasloulas, "Stable pinching by pair of robot fingers with soft tips under the effect of gravity", *Robotica*, Vol.20, No.1, pp. 1-11, 2002.
- [6] T. Inoue and S. Hirai, "Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing", *IEEE, IROS*, 2003.