

未知物体の表面位置・物性を同時計測可能な

1自由度ロボットフィンガーの開発

前田 弘文*, 五百井 清**

Development of One D.O.F. Robotic Finger for simultaneous sensing of the surface position and property of unknown objects

Hirofumi MAEDA*, Kiyoshi IOI**

ABSTRACT

We propose a one D.O.F. robotic finger for simultaneous sensing of the surface position and property of unknown objects. The robotic finger is equipped with a force sensor and a resonant mechanical element on its fingertip, and is automatically manipulated by the velocity-based force control. In this paper, we appear the surface sensing ability of our robotic finger using a computer simulation, and discuss the mechanical design and control system of the finger.

keywords: Robotic Finger, Shape Measurement, Object Impedance, Vibration Motor

1. はじめに

我々が未知環境を認識する場合、通常、視覚と接触覚とを併用していることを考慮すると、視覚センシングシステムに加えて、接触覚を有するセンシングシステムを開発する意義は大きい。このため、今までにも多くの接触型のセンシングシステムが開発されてきた。これらは、カメラとの併用を前提としたものや測定対象物の場所や物性を固定した(例えば、剛体としての反定)ものが

主流であり、周辺装置が大掛かりとなり、携帯性に欠けるきらいがある。^{(1)~(4)} また、唯一、未知物体の表面位置と表面物性を同時に測定するシステムの提案も見られるが、その推定法は信号処理アルゴリズムに依存した DD ロボットを利用した実験に留まっており、接触型の専用センサを目指したものではない。⁽⁵⁾ そこで、本研究では、暗闇や狭隘部の未知表面に対して、そ

*近畿大学大学院システム工学研究科

Graduate School of Systems Engineering, Kinki University

**近畿大学工学部知能機械工学科

Department of Intelligent Mechanical Engineering,

School of Engineering, Kinki University

の表面位置と表面物性を同時に推定できる、小型で携帯可能なロボットフィンガーの開発を目指す。⁶⁾ 特に、表面物性の推定のために、信号処理アルゴリズムを利用したソフトウェア的手法に代えて、小型振動モータを搭載したハードウェア的手法を採用する。

本論文では、最初に、搭載振動モータによる指先の共振を利用したロボットフィンガーに関して、そのセンシング原理を述べる。次に、直進型フィンガーの運動モデルを導出してシミュレーションを行い、提案する手法により未知表面の位置・物性推定が可能であることを確認する。最後に、本原理を元にした1自由度直進型ロボットフィンガーの設計を行い、その電子制御システムの構成についても述べる。

2. ロボットフィンガーの原理

図1に我々が最終開発目標とする多関節型ロボットフィンガーの全体像を示す。ただし、本図においては、複数関節部が破線として省略されている。将来、本フィンガーは自由度を付加して未知物体表面全体の探索動作を実施する予定であるが、以下、本文では x 方向(押し付け方向)のみに運動する、直進型ロボットフィンガーに限定して議論を行う。

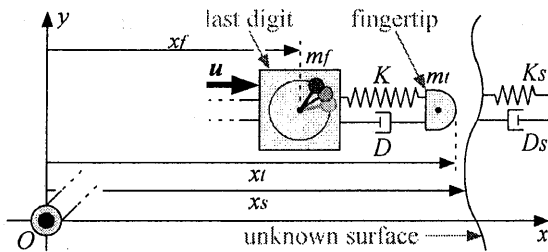


Fig. 1 Model of Sensing Finger

直進型ロボットフィンガーは、振動モータを搭載した指部(last digit)とばねを介して指部に接続された指先部(fingertip)とに大別される。

ここで、指部に搭載された振動モータは、指先部に大きな変位を持たせるために指先部の固有周波数を狙って振動させる。一般に、指部の等価質量は大きくなる傾向にあるため、振動モータの遠心力が指部の変位に影響を及ぼすことは少ないと考えられる。また、指部に力制御を採用することを前

提とした場合、指先部の固有周波数が高いため、力制御の帯域への大きな影響はないと予想される。このため、本フィンガーは、指先の位置 x_t より未知物体の表面位置 x_s を推定し、物体からの反力と指先の位置 x_t より物体表面の粘弾性を推定できると期待される。

3. ロボットフィンガーのモデリングと表面物性推定法

3.1 フィンガーの力学モデル

直進型ロボットフィンガーの設計と推定法の検証に利用するために力学モデルを導出する。ここでは、指部に搭載された直進用駆動部についての詳細なモデルは省略し、フィードバック制御された駆動入力 u が指部に作用するモデルとして取り扱う。以下に、使用する各変数の定義を示す。

- t : 時刻 [s]
- ω : 振動モータの角速度 [rad/s]
- K : 指部と指先部のばね定数 [N/m]
- D : 指部と指先部の粘性係数 [Ns/m]
- K_S : 対象物の弾性係数 [N/m]
- D_S : 対象物の粘性係数 [Ns/m]
- m_t : 指先部の質量 [kg]
- m_f : 指部の等価質量 [kg]
(ただし、指先部の質量 m_t は除く)
- x_t : 原点 O から指先への位置 [m]
- x_f : 原点 O から指部基準点への位置 [m]
- x_s : 原点 O から対象物の接触面への位置 [m]
- l : ばねが自然長であるときの指部基準点から指先までの長さ [m]
- u : アクチュエータによる駆動入力 [N]
- F_ω : 振動モータの遠心力 [N]
- F_K : ばね部が指先に及ぼす力 [N]
- F_S : 対象物が指先に及ぼす力の反作用力 [N]
- A : 振動モータの遠心力の振幅 [N]

指部の等価質量に関する運動方程式、および指先部の質量

に関する運動方程式は、以下となる。

$$m_f \ddot{x}_f = u + F_\omega - F_K \quad (1)$$

$$m_t \ddot{x}_t = F_K - F_S \quad (2)$$

ここで、 F_ω 、 F_K はそれぞれ、以下で表される。

$$F_\omega = (A \sin \omega t \quad A \cos \omega t)^T \quad (3)$$

$$F_K = (K(l + x_f - x_t) + D(\dot{x}_f - \dot{x}_t) \quad 0)^T \quad (4)$$

次に、指先と対象物表面の接触/非接触を考慮した場合の反作用力 F_S の関係式は以下となる。

$$x_{s0} > x_t \Rightarrow F_S = 0 \quad (5)$$

$$x_{s0} \leq x_t \Rightarrow$$

$$F_S = (K_S(x_t - x_{s0}) + D_S \dot{x}_t \quad 0)^T \quad (6)$$

ただし、関係式 (6) は、指先が対象物から常に離れないことを前提としているが、この条件は次節の力制御を用いることで実現できると考える。

3.2 フィンガーの力制御

表面位置・物性を推定するためには、ロボットフィンガーの指先を常に対象物に接触させる必要がある。加えて、指先が表面に触れていない状態でも動作可能なように、制御時には速度制御に力制御を重畳する形を採用する。以下にその制御式を示す。

$$u = K_V [K_I (F_D - F_S) - \dot{x}_f] \quad (7)$$

3.3 表面位置・粘弾性の推定法の提案

$F_\omega = 0$ のとき、力制御を施された指先が、常に未知物体の表面に接触していると仮定すると、力センサの整定値 F_{DC} に対して以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} F_{DC} &\triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} F_S(t) = \frac{K_V K_I}{1 + K_V K_I} F_D \\ &= K_S (x_{t0} - x_{s0}) \quad \left(x_{t0} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_t(t) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

さらに F_D を一定時間で切り替えることにより、以下の二つの整定値 F_{DC1} 、 F_{DC2} を得る。

$$F_{DCj} = K_S (x_{t0j} - x_{s0}) \quad (j=1,2) \quad (9)$$

式 (9) を利用して下式を得る。

$$F_{DC1} - F_{DC2} = K_S (x_{t01} - x_{t02}) \quad (10)$$

F_{DC1} と F_{DC2} は指先の力センサより得られ、 x_{t01} と x_{t02} は機構部に搭載された変位センサ(後述する試作機の場合、変位センサとエンコーダ)より得られる。よって、式 (10) より、対象物の弾性係数 K_S を推定することができる。また、 F_D と x_{t0} がすでに分かっているので、式 (9) から接触位置 x_{s0} も推定することができる。一方で、対象物の粘性係数 D_S を推定するために、力 F_S と指先位置 x_t の振幅比に着目する。式 (6) から振幅比の関係式は以下となる。

$$\frac{\|F_S(j\omega_C)\|}{\|x_t(j\omega_C)\|} = \sqrt{K_S^2 + D_S^2 \omega_C^2} \quad (11)$$

ここで、 $\|\cdot\|$ は振動モータが周波数 ω_C で回転し続けるときの定常振幅を示す。さらに、振幅 $\|F_S(j\omega_C)\|$ 、 $\|x_t(j\omega_C)\|$ および推定した K_S を使用することで、式 (11) から対象物の粘性係数 D_S が推定される。

4. 検証シミュレーション

表 1 に設計を想定した直進型ロボットフィンガーのシミュレーションパラメータを示す。

Table 1 Simulation parameters

Symbol	Unit	Value
K_I	Ns/m	64.443
K_I	m/sN	0.06818
F_D	N	0.98
K	N/m	10460
D	Ns/m	0.7446
m_f	kg	1.473
m_t	kg	0.0316
ω	rad/s	697.4
x_{50}	m	0.6519
l	m	0.108
A	N	20.0

図 2~4 に、それぞれ対象物が異なる場合の指先位置 x_t と反力 F_S の定常状態を示す。対象物が非常に硬い場合、跳ね返り現象を起こすが、それ以外においては、指先位置 x_t と反力 F_S に安定した振動現象が見られる。また、対象物の物性 (K_S, D_S) により、それぞれの指先位置と反力の振幅が異なる。したがって、この振幅の違いにより式 (11) を利用して、対象物の粘性係数を推定できると考えられる。

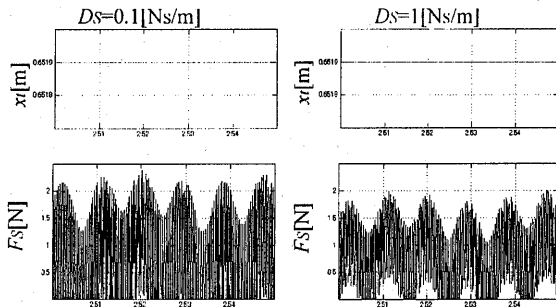


Fig. 2 Simulation results ($K_S = 1.0 \times 10^7$ [N/m])

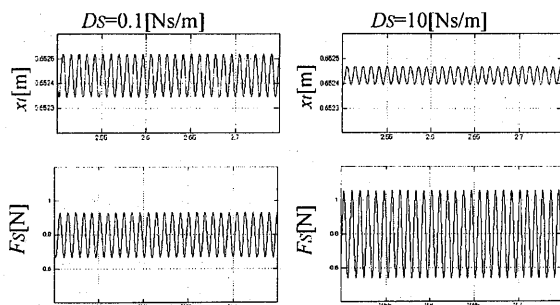


Fig. 3 Simulation results ($K_S = 1500$ [N/m])

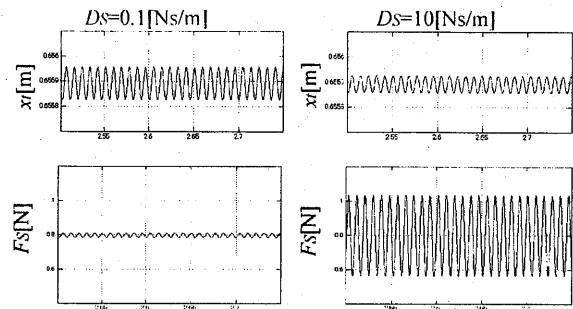


Fig. 4 Simulation results ($K_S = 200$ [N/m])

5.1 自由度ロボットフィンガーの製作

5.1 ロボットフィンガーの機構設計

本フィンガーの設計のポイントは、指先部の質量をできるだけ小さくして、指先共振部の固有周波数を高くすることにより、1 自由度並進駆動部の力制御帯域にはほとんど影響がないようにすることである。加えて、指部の加減速性能を最大限高めることにより、物体表面の凹凸に瞬時に対応できる速応性も求められる。

試作 1 自由度フィンガーを設計するにあたって、指先部は接触子と力センサにより構成し、指先部と指部との共振体として圧縮ばねを採用し、指部の並進駆動はセンサ付き DC モータの回転運動をスクリーボールにより並進運動に変換する機構とした。また、指部に搭載する振動モータは高速回転モータに偏心体を取り付けることにより実現し、指部と指先部の微小相対距離を計測するために渦電流を利用したギャップセンサを採用した。以下に、フィンガーを構成する部品の詳細を順に記す。

1) 接触子と力センサ

指先には、図 5 で示すように硬度のある接触子 (AT-V シリーズ: 株式会社キーエンス製) と共に力センサ (Pico Force Sensor :

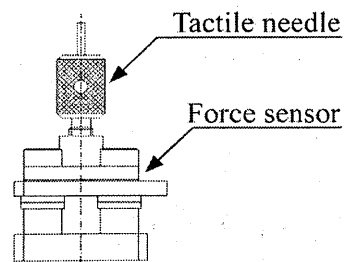


Fig. 5 Tactile needle and Force sensor

ニッタ株式会社製)を搭載している。力センサは、分解能約15[mN]、測定範囲±15[N]であり、ノイズ除去のために100[Hz]のローパスフィルタを通して使用する。

2) 圧縮ばね

圧縮ばねは、ばねの伸縮を実現するために指先を挟み込むようにして2個設置する。このとき、指先の固有周波数 ω には以下の関係が成り立つ。(K:圧縮ばねのばね定数, m_l :指先部の質量)

$$\omega = \sqrt{\frac{2K}{m_l}} \quad (14)$$

よって、指先変位を100[Hz]以上で振動増幅させるために、指先部の質量を約30[g]と見積もり、ばね定数が6[N/mm]以上の圧縮ばねを使用する。

3) DCモータとスクリーボール、およびリニアガイド

並進増幅は、図6で示すようにDCモータとスクリーボールにより行い、リニアガイドによって支えられる。ここで、各変数を以下のように定義し、各パラメータを表2に示す。

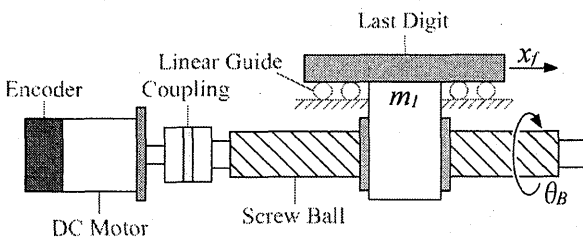


Fig. 6 Schema of Sliding Part

- x_f : 指部の並進変位 [m]
- L : スクリューボールのリード [m]
- θ_B : スクリューボールの回転角度 [rad]
- N_m : DCモータの回転数 [rpm]
- m_l : 移動体の質量 [kg]
- τ_B : モータの最大連続トルク [Nm]
- J_e : エンコーダの慣性モーメント [kgm²]
- J_m : DCモータの慣性モーメント [kgm²]

- J_C : カップリングの慣性モーメント [kgm²]
- J_B : スクリューボールの慣性モーメント [kgm²]

Table 2 Mechanical Design Parameters

Symbol	Unit	Value
L	m	9.0×10^{-3}
N_m	rpm	4400
m_l	kg	0.46
τ_B	N/m	24.9×10^{-3}
J_e	kgm ²	7.0×10^{-8}
J_m	kgm ²	1.3×10^{-6}
J_C	kgm ²	7.0×10^{-8}
J_B	kgm ²	2.1×10^{-7}

このとき、伝達部の摩擦を無視すると、DCモータとスクリーボールの間には、位置・速度・加速度において以下の3つの関係式が成り立つ。

$$\frac{x_l}{L} = \frac{\theta_B}{2\pi} \quad (15)$$

$$\dot{x}_l = \frac{N_m L}{60} \quad (16)$$

$$\ddot{x}_l = \frac{\tau_B}{\{J + (L/2\pi)^2 m_l\} (2\pi/L)} \quad (17)$$

$$J = J_e + J_m + J_C + J_B \quad (18)$$

式(17)を用いて、最大加速性能を引き出せる機械的インピーダンスマッチングを行った結果、⁽⁷⁾ DCモータには、maxon社製のコアレスモータ(RE-max 321500)を使用し、スクリーボールにはKSS株式会社製のMR-H0609A-208を使用することにした。以上、式(15)~(18)より、最大速度は0.66[m/s]、最大加速は14.96[m/s²]となる。

また、式(15)より、並進変位の分解能はエンコーダの分解能が1000[count/rotation]であり、スクリーボールのリードが9[mm]であるため、約2.3[μm]となる。

4) 振動モータ

指先部を共振させるために、指部には100[Hz] (6000[rpm])

以上で回転可能な垂付き振動モータを搭載している。図7に使用する振動モータの1例を示す。

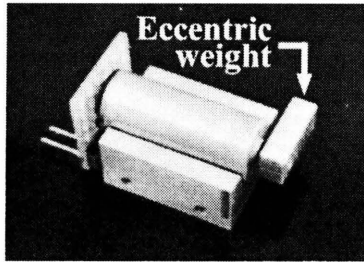


Fig. 7 Vibration motor

5) ギャップセンサ

ギャップセンサには、株式会社リベックス製の過電流型パルスコーダを使用し、分解能は約 $14[\mu\text{m}]$ で $0\sim 14[\text{mm}]$ の範囲で測定可能である。図8に非接触型変位センサを示す。

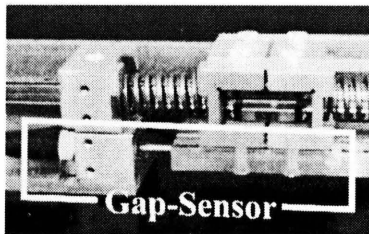
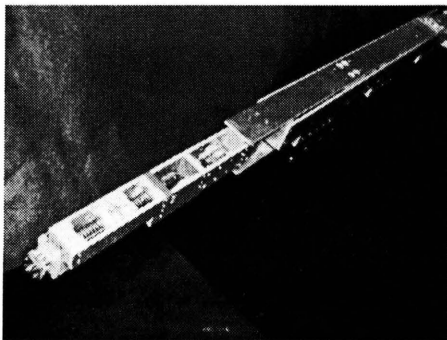


Fig. 8 Magnetic gap-sensor

最後に、製作した1自由度ロボットフィンガーの全体像を図9に示す。



5.2 ロボットフィンガーの電子制御部

1自由度フィンガーの電子制御の設計にあたっては、2つのマ

イコン (H8/3048F, SH7045F) を使用して制御機能を分配する方法を採用した。この方法は、2台のマイコンを用いることで、モータのサーボ制御(H8/3048F)と全体の統合(SH7045F)とに仕事を分担させることができる。将来、自由度を増やした場合においても、モータ1つに対して制御用マイコンを1つ追加し、簡単なプログラムの変更と電気回路の追加を行うことで容易に対応できるメリットを持っているからである。

図10に1自由度フィンガーの信号処理の流れを示す。SH7045Fは、A/D変換を用いてリアルタイム計測を行い、PCにデータを送信している。また、力フィードバックに必要な力センサ値をH8/3048Fに送信している。H8/3048Fは、SH7045Fから送られてきたデータとモータのエンコーダ値を元に、 $1[\text{ms}]$ 周期のフィードバック制御を実現している。また、フィンガーに接続されたPCは、SH7045Fから送られてきたデータを元に対象物の物性の推定計算を行う。

以下に、フィンガーを構成する電子部品の詳細を順に示す。

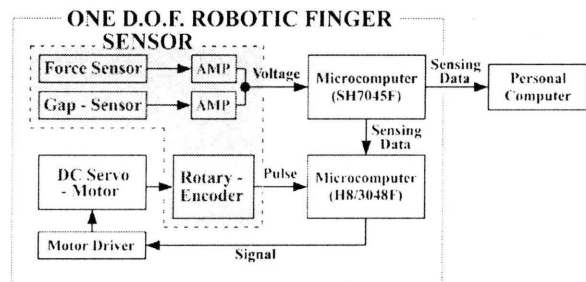


Fig. 10 Signal processing systems

1) マイコン SH7045F

全体の統合に仕様するマイコンは、株式会社ベストテクノロジー製のSH7045Fマイコンボードである。図11にSH7045Fの外観図を示す。

SH7045Fは、高い演算能力を生かし、リアルタイムに10bitのA/D変換を4ch同時に行い、PCにデータを送信している。また、フィードバックに必要な力センサ値(力センサのZ軸のデジタル値8bit)をI/OポートによってH8/3048Fに送信している。

フィンガーの自由度を増やした際は、このI/Oポートから送信される指令値をマルチプレクサによって、各モータの制御のマイコンに分配することで対応できる。

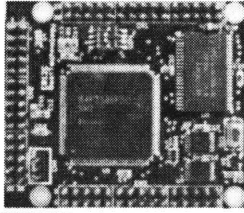


Fig. 11 Micro-computer:SH7045F

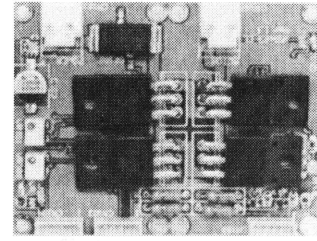


Fig. 13 Motor driver :iMDs03CL

2) マイコン H8/3048F

モータ制御に仕様するマイコンは、秋月電子通商の AKI-H8/3048F マイコンボードである。図 12 に H8/3048F の外観図を示す。

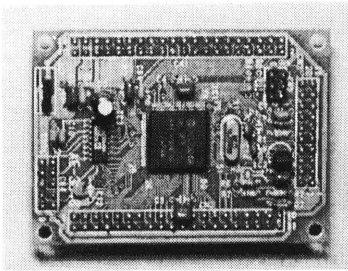


Fig. 12 Micro-computer:H8/3048F

H8/3048F には、ITU (インテグレートド・タイマ・ユニット) に位相係数モードがあり、インクリメンタル方式のロータリーエンコーダから直接エンコーダをカウントすることができる。この位相係数モードを使用することで、エンコーダカウンタから得られる回転角と SH7045F から送られる力センサデータとを使用して、1[ms]周期のフィードバック制御を実現している。

3) モータドライバ iMDs03CL

モータ制御に使用する iXs Research 社製モータドライバ iMDs03CL は、高出力モータ用であり、電流制限機能を付加している。入力信号には PWM 信号を採用しているため、H8/3048F と直接接続して使用することができる。図 13 にモータドライバの外観図を示す。

最後に、製作した 1 自由度ロボットフィンガーの電子制御部全体像を図 14 に示す。

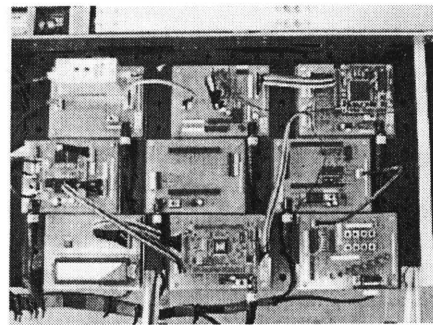


Fig. 14 System Integration of Electrical parts

6. おわりに

本論文では、実環境における未知物体の表面位置と表面物性を同時に計測することができるロボットフィンガーを提案し、1 自由度直進型フィンガーの試作を行った。主な内容を、以下に示す。

(1) 未知物体の表面位置・物性を推定するために、指部に振動モータを搭載し、指先に力センサと共振体を有するロボットフィンガーの提案を行った。

(2) 力制御方式を実装した本ロボットフィンガーを使って、物体の表面位置と粘弾性が推定できることを、計算機シミュレーションにより確認した。

(3) 試作した 1 自由度ロボットフィンガーに関して、その機構設計法を論じ、電子制御部の構成を述べた。

最後に、今後の研究課題を示す。

1) 1 自由度直進型フィンガーを用いた基礎特性試験

2) ロボットフィンガーとしての多自由度化

1) に関しては、今回製作した直進型フィンガーを用いて、力制御性能と表面物性値の推定性能、表面位置の推定性能の基本特性試験を行い、推定法の有効性を確認する必要がある。

2) に関しては、実用性・応用性の観点から、早急に多自由度化に向けた基本設計に取り掛かる必要がある。

7. 文献

- (1) 坂根茂幸, 石川友彦, 佐藤知正, “視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5(1994), pp. 677-684.
- (2) 今村信昭, 福田敏男, 金子真, “ロボット指による剛性と接触位置の能動的触覚センシング”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.600(1996), pp. 3181-3187.
- (3) N. Ueno, M. Sivinini, M. Kaneko, Dynamic Contact Sensing by Flexible Beam, *Transaction of the IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 3, No. 4 (1998), pp. 254-264.
- (4) M. Kaneko, T. Tsuji, Tactile differentiator, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2001), pp. 4023-4028.
- (5) 江村暁, 館暉, “形状とインピーダンスの同時測定法”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7(1997), pp. 37-43.
- (6) H. Maeda, K. Ioi, H. Yokote, A study on robotic finger for simultaneous sensing of the shape and the mechanical impedance on unknown surfaces, *Proceedings of 2006 International Symposium on Flexible Automation*, (2006), CD-ROM pp. 901-904.
- (7) 高森年, メカトロニクス, オーム社, (1999), pp.45-46.