

学術論文

小型ソフトハンドリンググリッパを用いたアクティブセンシングの研究 (把持対象物の計測同定)

Active sensing using soft handling miniature gripper (Identification of grasped object)

金 永喆	(東北大学)	長南 征二	(東北大学)
江 鐘偉	(東北大学)	田中 真美	(東北大学)
廣瀬 太一	(オルガノ)		

Young Chul KIM	Student Member
Seiji CHONAN	Member
Zhong-wei JIANG	Member
Mami TANAKA	Member
Taichi HIROSE	

This paper is concerned with the active sensing using a two-fingered miniature gripper driven by a piezoceramic stack. A linkage that transforms the actuator longitudinal dilation into the lateral fingertip motion is designed. A strain gauge is placed at the bottom of a flexible finger for sensing the stiffness of an object grasped at the tip of the finger's. A mathematical model of the system is developed and applied to the study of the active sensing where the gripper is driven to grasp the object with a time step response.

Key Words: Active Sensing, Soft Handling Gripper, Measurement of Stiffness, PVDF Actuator, Identification

1 緒言

近年、ロボット開発の発展に伴いロボットハンドの高機能化・高精密化が計られている。ロボットハンドを用いて微細で柔らかい対象物を傷を付けずに安定に把持させるには、微妙な把持力制御と高精度な位置決め、さらには対象物の柔らかさや形状を何らかの方法で知覚する等の技術開発が必要である [1]。しかしながらこれまでに開発された多指ハンドの多くは、アクチュエータからハンドへの動力伝達にワイヤ等の非線形性の大きい要素を用いており、これらを忠実に実現することは難しい。また多くの場合アクチュエータ

としてサーボモータを用いており、小型化に限界がある。これらの条件をクリアできるロボットハンドとして長南らは積層型圧電素子をアクチュエータとして用いた小型二本指機構を開発した [2-3]。

アクティブセンシングに関する研究は今日までいくつか行われている。舟橋ら [4] はハンドに適切な検出動作をさせ、検出動作前後の二つの状態のセンサ情報から接触点と接触力を求める方法を提案している。金子ら [5] はアクティブセンシングについて、一つはセンサ側からアクティブに信号を環境に発射するということ、もう一つはセンサ系をアクティブに動かすことと定義している。後者のタイプは、センサ系に直接運動を追加することによってセンシングの領域を拡大したり、もともとのセンサで得られない新しい情報を検

連絡先 : Kim, Young Chul, Chonnam Youngam-kun samho-ri sanho-myun, Daebul University, Dept. of Electrical and Electronic eng.

出するものである。具体的なアクティブセンシングの研究としては、動的能動触覚 [6]、アクティブセンシングを用いた視触覚融合システム [7] および人工能動触覚 [8] 等があげられる。

本研究はこれらの問題の一つとして、積層型圧電素子で駆動される小型二本指機構を用いて、指先端が対象物を把持したときに指根元に生じる曲げひずみを計測し対象物の硬さを判断するアクティブセンシングを、理論と実験により解析する。さらに、曲げひずみの実験値と理論値を比較することによって、対象物の等価ばね定数を同定することが可能であることを示す。

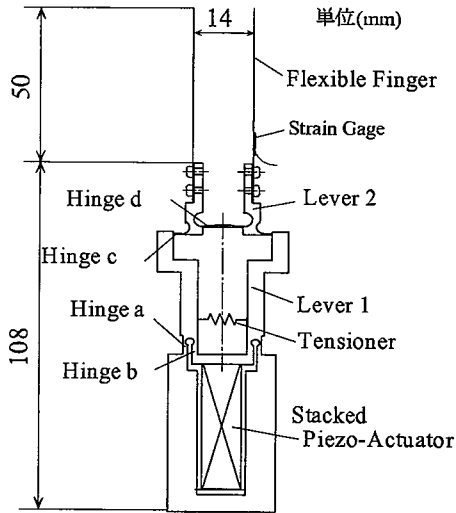


Fig. 1: Physical schematic diagram of gripper

2 ソフトグリッパの二本指機構

図 1 は積層型圧電素子により駆動される小型ソフトハンドリング・グリッパを示す。本機構は二本指を駆動するための圧電素子、素子の縦変位を把持動作の横変位に変換する変位拡大機構、機構先端に取り付けられた指部としてのフレキシブルはり、さらには指根元に貼り付けられたひずみゲージより構成されている。アクチュエータとして用いた積層型圧電素子 (TOKIN

NLA-10 × 10 × 18) は発生変位が微小であるため変位拡大機構で把持部先端の大きな変位を得るようにしている。変位拡大機構は図に示すようにレバー、弾性ヒンジおよびフレキシブルはりからなっており、アクチュエータとしての積層型圧電素子の伸縮変位によりヒンジ a をたわませ 2 本のレバー 1 を互いに逆向きに回転させ、レバー先端のヒンジ c, d を介して 2 本のレバー 2 を開閉する二段機構である。さらに変位拡大機構先端には、柔らかい微小な対象物を把持するためのフレキシブルはりがボルトで固定されている。レバー 2 の開閉運動をこのフレキシブルはりに伝え、はり先端での把持動作を実現している。機構部は構造的には多少複雑であるが、単一材料 (りん青銅) より放電加工で製作されており、駆動時のヒンジ部変形に無駄がなく効率的に変位や力をフレキシブルはりに伝えられるようになっている。また把持のフレキシブルはり (指部) はボルトで取り替え可能となっているため、把持対象物に応じて剛性や形状の異なるはりを用いることができる。なお、ひずみゲージ (ゲージ長 = 5 mm) はフレキシブルはり根元の 4 - 9 [mm] の位置に貼り付けられている。以下、はり根元にひずみゲージ出力を用いて対象物の剛性を同定する問題を考える。

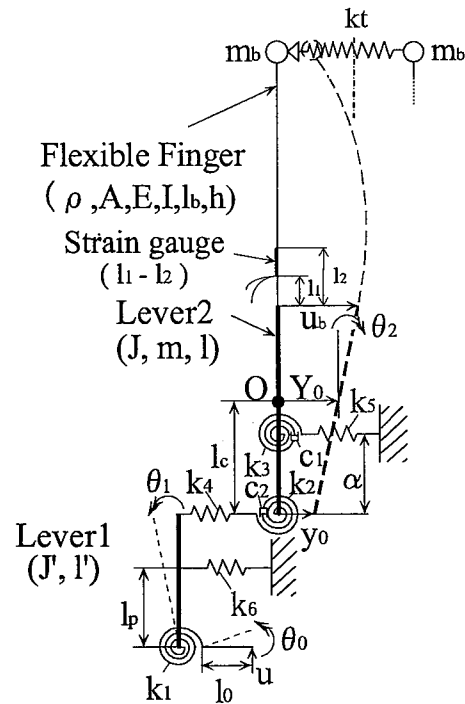


Fig. 2: Theoretical model of gripper

3 グリッパのモデル化と理論解析

図 1 に示した二本指把持機構は左右対称であるため、以下機構の左半分を考え図 2 のようにモデル化する。図中、 k_t は把持対象物等価ばね定数、 m_b は把持対象物の質量 M を両 Finger に振り分けた値であり $m_b = M/2$ である。図 1 のヒンジ a と b は回転ばね k_1 で、ヒンジ c は回転ばね k_2 、並進ばね k_4 およびダッシュポット c_1 で、またヒンジ d は回転ばね k_3 、並進ばね k_5 およびダッシュポット c_2 でモデル化する。さらに積層型圧電素子と機構間の変位および力の伝達損失を減少させるためのテンショナーは並進ばね k_6 でモデル化する。なお、機構の粘性減衰はヒンジ c および d において考えるものとし、レバー 2 の回転速度に比例する粘性減衰モーメントが作用するものとする。また、それぞれの粘性減衰係数を c_1 および c_2 とする。レバー 1 および 2 は共に剛体と仮定し、レバー 1 は回転運動を、レバー 2 は回転および並進運動を行うものとする。積層型圧電素子の発生変位 $u(t)$ が回転ばね k_1 に回転角 θ_0 を与え、機構が駆動される。以下、はり根元の曲げひずみの変化量 ΔS から把持対象物の等価ばね定数 k_t を同定する問題を二本指機構に対する岡田の解析モデル [9] を用いて行う。この場合の機構部ならびにフレキシブルはりの運動方程式は以下のようになる。

●機構部の運動方程式

レバー 1 の回転運動

$$J'\ddot{\theta}_1 = -k_1(\theta_1 - \theta_0) - k_4(l'\theta_1 + y_0)l' - k_6l_p^2\theta_1 \quad (1)$$

レバー 2 の回転運動

$$J\ddot{\theta}_2 = -(k_2 + k_3)\theta_2 + k_4(l'\theta_1 + y_0)l_c + k_5(y_0 + \alpha\theta_2)(l_c - \alpha) - (c_1 + c_2)\dot{\theta}_2 \quad (2)$$

レバー 2 の並進運動

$$m\ddot{Y}_0 = -k_4(l'\theta_1 + y_0) - k_5(y_0 + \alpha\theta_2) \quad (3)$$

上式において式中の記号は以下のように与えられる。

- J' : レバー 1 の回転中心回りの慣性モーメント
- J : レバー 2 の重心回りの慣性モーメント
- l_0 : ヒンジ a とヒンジ b の距離
- l' : レバー 1 の長さ
- l : レバー 2 の長さ
- m : レバー 2 の質量
- l_p : レバー 1 の根元からテンショナーまでの距離
- l_c : レバー 2 の根元から重心までの距離
- α : ヒンジ c とヒンジ d の距離
- Y_0 : レバー 2 の重心の並進移動距離
- θ_1 : レバー 1 の回転角
- θ_2 : レバー 2 の回転角
- y_0 : レバー 2 根元の並進移動距離
- θ_0 : 積層型圧電素子による入力角

レバー 2 の重心の並進移動距離 Y_0 および圧電素子による入力角 θ_0 は次のように表せる。

$$Y_0 = y_0 + l_c\theta_2, \quad \theta_0 = \frac{u}{l_0} \quad (4)$$

上式を式 (1) および (2) に代入すると、式 (1) - (3) は次式のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} J'\ddot{\theta}_1 &= -k_4l'y_0 - (k_1 + k_4l'^2 + k_6l_p^2)\theta_1 + k_1\frac{u}{l_0}, \\ \ddot{\theta}_2 &= (k_4l_c + k_5(l_c - \alpha))y_0 + k_4l'l_c\theta_1 \\ &\quad + (k_5(l_c - \alpha)\alpha - k_2 - k_3)\theta_2 - (c_1 + c_2)\dot{\theta}_2, \\ m(\ddot{y}_0 + l_c\ddot{\theta}_2) &= \\ &\quad - (k_4 + k_5)y_0 - k_4l'\theta_1 - k_5\alpha\theta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

●はりの運動方程式

$$[\rho A + m_b\delta(x - l_b)]\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI(1 + c\frac{\partial}{\partial t})\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (6)$$

ここに

- x : はりの根元からの位置
- ρ : はりの密度
- A : はりの断面積
- E : はりの縦弾性係数
- I : はりの断面二次モーメント
- l_b : はりの長さ
- c : はりの内部減衰係数

はり根元には強制変位 $u_b(t)$ および強制回転角 $\theta_2(t)$ が作用し、さらにはり先端には等価ばね定数 k_t の対象物が把持されているとすると、片側はりに対する境界条件は次のように与えられる。

$$y(0, t) = u_b(t), \quad \frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = \theta_2(t),$$

$$\frac{\partial^2 y(l_b, t)}{\partial x^2} = 0, \quad EI \frac{\partial^3 y(l_b, t)}{\partial x^3} = 2k_t y(l_b, t) \quad (7)$$

ここで式 (6) の解を

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N X_n(x) T_n(t) + \sum_{i=1}^2 g_i(x) f_i(t) \quad (8)$$

とおく。ここに $X_n(x)$ は一端固定他端弾性ばね支持はりのモード関数、 $g_i(x)$ は上式が境界条件を満たすよう決定される 3 次の多項式、 T_n と f_i はそれらに対応する時間関数、 $f_1(t) = u_b(t)$ 、 $f_2(t) = \theta_2(t)$ である。また、 N は近似項数を表わす。

式 (8) を式 (6) に代入して整理すると

$$\sum_{n=1}^N X_n(x) \{ \ddot{T}_n(t) + cp_n^2 \dot{T}_n(t) + p_n^2 T_n(t) + \sum_{i=1}^2 g_i(x) \ddot{f}_i(t) \} = 0 \quad (9)$$

ここに p_n は固有角振動数を表わす。さらにモード関数の直交性

$$\int_0^{l_b} X_n(x) X_m(x) dx = \begin{cases} 0 & (n \neq m) \\ \phi_n & (n = m) \end{cases}$$

を用いて変形すると

$$\ddot{T}_n(t) + cp_n^2 \dot{T}_n(t) + p_n^2 T_n(t) + \frac{1}{\phi_n} \sum_{i=1}^2 \ddot{f}_i(t) \int_0^{l_b} g_i(x) X_n(x) dx = 0 \quad (10)$$

$u_b(t) = y_0(t) + l\theta_2(t)$ を用いて整理すると上式は

$$\ddot{T}_n(t) + cp_n^2 \dot{T}_n(t) + p_n^2 T_n(t) + \alpha_n \ddot{y}_0(t) + (\alpha_n l + \beta_n) \ddot{\theta}_2(t) = 0, \quad n = 1, 2, \quad (11)$$

のようになる。ここで

$$\alpha_n = \frac{1}{\phi_n} \int_0^{l_b} g_1(x) X_n(x) dx,$$

$$\beta_n = \frac{1}{\phi_n} \int_0^{l_b} g_2(x) X_n(x) dx \quad (12)$$

以下、はりの 2 次振動モードまでを考慮して解析することとし、式 (5) および (11) を連立してマトリクス表示すると

$$M \ddot{X} + \Gamma \dot{X} + K X = U u \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & J' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J & 0 & 0 \\ m & 0 & ml_c & 0 & 0 \\ \alpha_1 & 0 & \alpha_1 l + \beta_1 & 1 & 0 \\ \alpha_2 & 0 & \alpha_2 l + \beta_2 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_4 l' & k_1 + k_4 l'^2 + k_6 l_p^2 & & & \\ -k_4 l_c - k_5(l_c - \alpha) & -k_4 l' l_c & & & \\ k_4 + k_5 & k_4 l' & & & \\ 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & & & \\ & 0 & 0 & 0 & \\ k_2 + k_3 - k_5(l_c - \alpha)\alpha & 0 & 0 & & \\ k_5 \alpha & 0 & 0 & & \\ 0 & p_1^2 & 0 & & \\ 0 & 0 & p_2^2 & & \end{bmatrix},$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 + c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cp_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & cp_2^2 \end{bmatrix},$$

$$U = [k_1/l_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (14)$$

ここに

$$X = [y_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad T_1 \quad T_2]^T \quad (15)$$

本システムにおける出力は、はり根元に貼り付けたひずみゲージ信号である。ひずみゲージの貼り付け位置を $l_1 \leq x \leq l_2$ 、はり厚さを h とすると、ゲージの曲げひずみ出力の理論値は次のような平均値で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{h}{2(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} dx. \quad (16)$$

以下、上記の連続時間系をサンプリング周期で一定と見なす 0 次ホールド近似を用いて離散化し、得られた離散時間系状態方程式をもとに数値解析を行う。

4 実験

本実験で使用した装置の概略を図 3 に示す。コンピュータ (IBM 互換機) により作製した入力電圧波形を D/A 変換器 (INTERFACE IBX-3309) よりアンプを通して圧電素子に入力し、はり根元に発生する曲げひずみをひずみゲージで検出し、ブリッジボックスおよびひずみゲージアンプ (MINEBEA DSA-605C) を経由してオシロスコープ (HITACHI VC7104) に入力、観測する。以下、把持対象物の硬さとはり材質がはり根元の曲げひずみに与える影響を調べる。

4.1 対象物の硬さのはり根元ひずみへの影響

把持対象物の厚さの違いによってはり根元の曲げひずみがどのように変化するかを調べるため、対象物とはりの距離を変えて、以下のような実験を行った。まずステンレス製のはり 1 本を機構のレバー 2 に取り付け、マイクロメータに固定した対象物をはり先端に近付け、はりの距離 D を 0~1mm まで 5 段階で変化させた。次に、それぞれの状態で 0 から 100V ま

で線形に増加する電圧を素子に印加し、はり根元の曲げひずみを測定した。対象物には硬さの異なるものとして幅 13.5[mm] の剛体、発泡スチロールおよびスポンジの 3 種類を用い実験を行った。得られた結果を図 4 に示す。図より、はり先端と対象物との距離によってはり根元に生じる曲げひずみの大きさは変化するが、対象物が同一の場合曲げひずみの傾きは一定となり対象物の硬さに依存して変化することがわかる。

前記実験と同様にはりと対象物の距離 D を変化させて、図 5 に示される電圧を圧電素子に印加しはり根

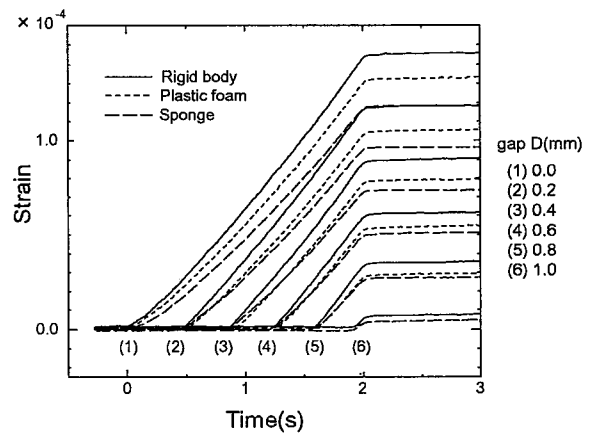


Fig. 4: Variation of strain depending on contact distance between object and finger beam (ramp input)

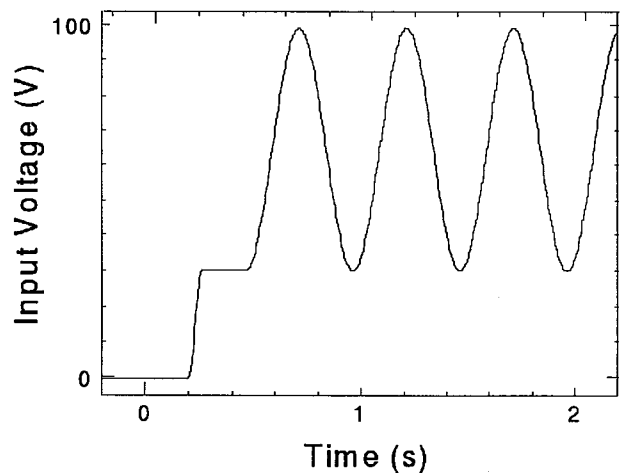


Fig. 5: Input voltage to piezoelectric actuator

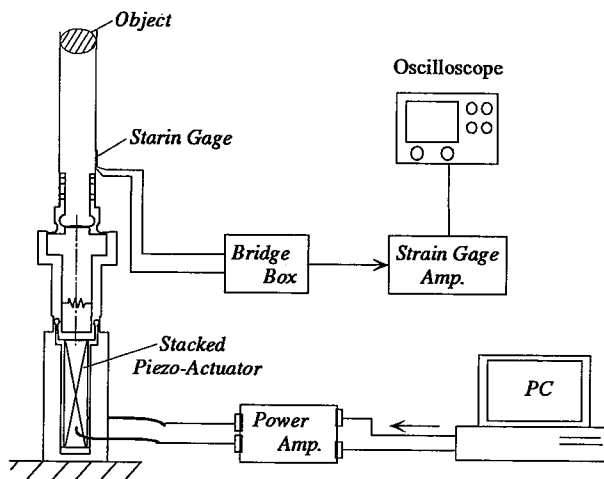


Fig. 3: Experimental setup for active sensing

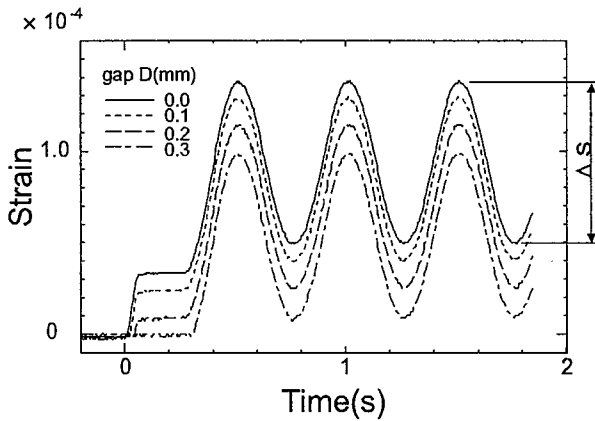


Fig. 6: Variation of strain to input voltage of Fig.5

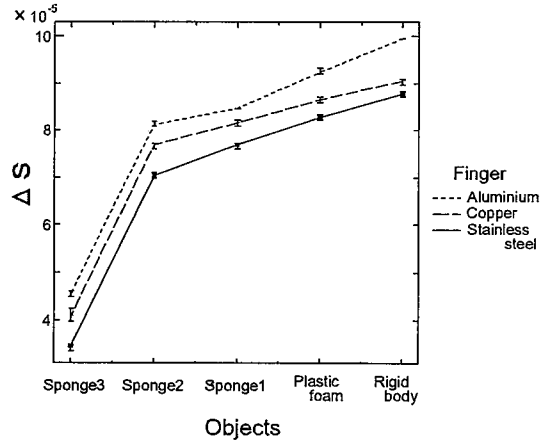


Fig. 7: Variation of peak-to-peak strain when flexible beam material is changed

Table 1: Variation of strain ΔS ($\times 10^{-5}$)

Gap D(mm)	0.0	0.1	0.2	0.3
剛体	8.730	8.723	8.883	8.864
発砲スチロール	8.243	8.204	8.199	8.194
スポンジ	7.564	7.580	7.472	7.460

元の曲げひずみを前記3種類の対象物について測定した。対象物が剛体の場合の結果を図6に示す。また、入力電圧の正弦波部分に対応するはり根元の曲げひずみの変化量 (peak-to-peak) ΔS を D の値を変えて求め比較したものが表1である。表より ΔS の値は対象物によってほぼ一定であり、対象物の硬さに依存して変化することがわかる。これより、ひずみの変化量 ΔS の大きさから対象物の硬さを判断することが可能であることが予測される。

4.2 はり材質とはり根元ひずみの関係

ステンレス製はりを把持機構の両側に取り付け、把持対象物として前記の3対象物ならびにスポンジ2およびスポンジ3 (スポンジは数字が大きいものほど柔らかい) を選択し、図5の電圧を圧電素子に印加しはり根元の曲げひずみを測定した。さらに銅およびアルミニウムのはりを用いて同様な実験を行った。得られた結果を合せて図7に示す。図より、はり材質の変化にかかわらずはり根元の曲げひずみの変化量 ΔS は対象物の硬さに比例して変化することがわかる。

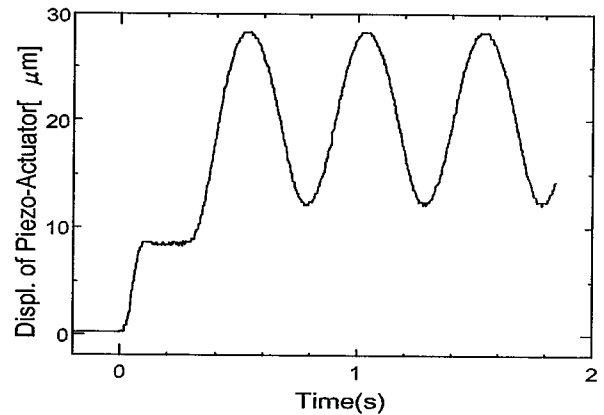


Fig. 8: Displacement of piezo-actuator driven by input voltage of Fig.5 (theoretical result)

5 数値計算ならびに実験結果

はり根元の曲げひずみの変化量から対象物の等価ばね定数を同定するため、図2に示す岡田の数値解析モデル [9] を用いて計算を行い、実験結果と比較する。

まず、はり根元の曲げひずみとはり先端の発生力および発生変位の関係を調べるため、はり先端のばね定数を種々変化させた場合の ΔS の値を数値計算により求める。入力としては図8に示す圧電素子の変位を使用する。はり根元の曲げひずみ変化量 ΔS とはり先端発生力 F および発生変位 D の関係式は数値解析

により次のように求まる。

$$F = 1.058272 \times 10^2 \Delta S,$$

$$D = -6.386120 \Delta S + 0.5339833 \times 10^{-3} \quad (17)$$

これよりはり先端の対象物のばね定数 k_t [N/m] と ΔS の関係が次のように得られる。

$$k_t = \frac{F}{2D}$$

$$= \frac{1.058272 \times 10^2 \Delta S}{-12.77224 \Delta S + 1.0679666 \times 10^{-3}} \quad (18)$$

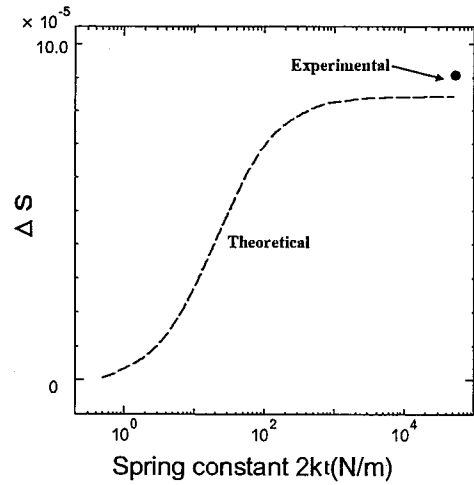
さらに上式をはり根元の曲げひずみ変化量 ΔS により整理すると次のように求まる。

$$\Delta S = \frac{1.0679666 \times 10^{-3} \times k_t}{1.058272 \times 10^2 + 12.77224 \times k_t} \quad (19)$$

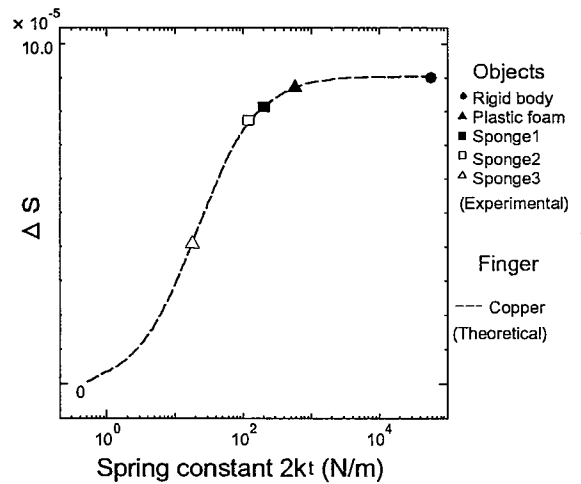
上式より、図 8 で表される変位をグリッパに入力したときのひずみ変化量 ΔS よりはり先端の対象物の剛性を知ることができる。

はり先端のばね定数 k_t [N/m] とはり根元の曲げひずみ ε の関係を求め、理論値と実験値を比較したものが図 9(a) である。図中、破線は銅製はりに対する理論結果を示し、右上にある点は対象物の等価ばね定数が十分に大きいとき（剛体と見なされる場合）の実験結果である。図より、はり先端のばね定数が極めて大きい場合と極めて小さい場合にはばね定数の変化に対してはり根元のひずみ出力の変化は非常に小さくなることがわかる。数値計算と実験値を比較すると、対象物が剛体の場合、はり根元の曲げひずみ出力の理論値は 8.444×10^{-5} 、実験値は 9.058×10^{-5} であることより、本理論値と実験値の誤差はおよそ 7% である。

誤差の影響を補整するために理論値に比例係数 1.072 をかけ、補正して得られた曲線上に実験値 ΔS をプロットしたものが図 9(b) である。図より、理論値と実験値は一値しており、本図を用いれば得られたはり根元の曲げひずみ ΔS と把持対象物の等価ばね定数の関係を示す式 (19) および図 9 から把持対象物の剛性を同定することが可能であることが分かる。



(a)



(b)

Fig. 9: Relation between equivalent spring constant and variation of strain, (a) theoretical results (b) after compensation

6 結言

二本指機構の把持動作を用いて対象物の剛さを同定する方法を提案し理論と実験で確認した。得られた結果を要約すると次のようになる。

1. 圧電素子への単調増加入力電圧に対して対象物の材質が同一の場合対象物の大きさにかかわらず根元の曲げひずみ増加の傾きは対象物の硬さにのみ依存して変化する。
2. 周期的に変動する電圧を圧電素子に印加し根元に生じる曲げひずみの理論値と実験値を比較検討することによって把持対象物のおよその等価ばね定数を同定することが可能である。

(1997年8月6日受付)

参考文献

- [1] 今井 信昭ら, 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) 62, 600, (1996-8), 3181-3187.
- [2] S.Chonan, Z.W. Jiang and M.Sato, Force control of a soft-handling gripper driven by a piezoceramic stack, Nonlinear electromagnetic system, (1996), 847-850.
- [3] 江ら, 日本機械学会論文集 (C編) 62, 595, (1996-3), 920-927.
- [4] 舟橋ら, 日本機械学会論文集 (C編) 61, 589, (1995-9), 163-169.
- [5] 金子, 計測と制御, 35, 4, (1996), 274-277.
- [6] 上野ら, 日本ロボット学会誌 15, 1, (1997), 61-67.
- [7] 向井ら, 日本ロボット学会誌 15, 1, (1997), 75-81.
- [8] 日野ら, 日本ロボット学会誌 15, 1, (1997), 68-74.
- [9] 岡田 卓也, 小型ソフトハンドリング・グリッパの微細把持力制御, 東北大学修士学位論文, (1995).