

圧電素子で駆動される小型把持機構を用いた
アクティブセンシングの研究*
(柔軟微小対象物の質量と剛性の同定)

金 永 喆*¹, 長南 征二*², 江 鐘 偉*²

Active Sensing Using Miniature Gripper Driven
by Piezoelectric Bimorph Actuators
(Identification of Mass and Stiffness of Minute Flexible Objects)

Young-Chul KIM, Seiji CHONAN and Zhong-Wei JIANG

This paper is a study on the identification of physical parameters of flexible minute objects by the active sensing using a two-fingered miniature gripper. The gripper is consisting of two flexible fingers actuated by piezoelectric bimorph strips, which ride respectively on translation stages driven by fine ball screws. A semi-conductor strain gauge is bonded on the surface of one finger to measure the vibration of the coupled finger-grasped object system. First, the two fingers are shifted laterally until they come in contact with the object and hold it. Then, one piezo-actuator of gripper is driven by a step input voltage so that the two fingers shake the grasped object. The first natural frequencies of symmetric and antisymmetric modes of the coupled system are read through the spectral density analysis of the strain gauge output, from which the mass and stiffness of the grasped object are determined uniquely. The proposed identification method is studied theoretically and its effectiveness is verified experimentally by using a sponge rubber block and a salmon roe.

Key Words: Active Sensing, Miniature Gripper, Piezo-Actuator, Grasping, Identification

1. 結 言

人間が微小な物体を把持し同定する場合、一般には親指と人差し指で対象物を把持し、指をアクティブに動かすことで対象物の質量や剛性を評価している。近年、生物工学分野では小型ロボットグリッパ(1-2)を用いた作業の自動化、効率化が試みられているが、これらのグリッパは単純なオンオフの把持動作を行うのみであり、把持対象物についての認識能力を有するインテリジェントグリッパの開発は未だなされていない。一般に、対象物を安定に把持するためには対象物についての情報収集を行うことが必要である。たとえば柔

らかくて小さい対象物を把持する場合は、その質量と剛性を知ることが把持を安定して行ううえで有効である。

アクティブセンシングに関する研究は今日までいくつも行われている。舟橋ら⁽³⁾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⁽⁴⁾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出するものである。具体的なアクティブセンシングの研

* 原稿受付 1997年6月30日。

^{*1} 准員, 東北大学大学院(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉04)。

^{*2} 正員, 東北大学工学部。

究としては、アクティブセンシングを用いた視触覚融合システム⁽⁵⁾、動的能動触覚⁽⁶⁾、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⁽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ひとつとして、圧電素子で駆動される二本指機構⁽⁹⁻¹⁰⁾を用い、機構をアクティブに動かすことでフレキシブルフィンガに貼付したひずみゲージの出力を求め、そのパワースペクトル解析より1次の同位相および逆位相モードの固有振動数を決定、把持対象物の質量と剛さを同定する方法を提案し、理論解析と実験によりその有効性を確認するものである。

2. 理論解析

2.1 二本指機構のモデル化と運動方程式の導出

二つの指が対象物と接触した状態での二本指機構のモデルを図1に示す。以下、それぞれの指を Finger 1, Finger 2 と呼ぶことにする。各 Finger は一端が固定されたバイモルフ型圧電素子とその先端に取り付けた銅製の弾性はりよりなる。Finger 1 の根元にはひずみゲージが取り付けられている。図において K_s は対象物の等価ばね定数であり、対象物の質量 m は両指先端に集中質量として振り分けられ、それぞれ $m_1, m_2 (= m/2)$ と示されている。以下、ひずみの信号出力より対象物の質量と剛さを評価する問題を考える。Finger $i (= 1, 2)$ の単位長さあたりの質量を $\rho A_i(x)$ 、曲げ剛性を $EI_i(x)$ とすると、それらは次のように表される。

$$\rho A_i(x) = \begin{cases} \rho_p^i A_p^i & \text{for } 0 \leq x \leq a, \\ \rho_b^i A_b^i & \text{for } a \leq x \leq l, \end{cases}$$

$$EI_i(x) = \begin{cases} E_p^i I_p^i & \text{for } 0 \leq x \leq a, \\ E_b^i I_b^i & \text{for } a \leq x \leq l, \end{cases}$$

$$i = 1, 2. \quad (1)$$

ここで、 ρ_p^i, A_p^i, E_p^i および I_p^i は Finger i の圧電素子の、また ρ_b^i, A_b^i, E_b^i および I_b^i は弾性はり部の密度、断面積、縦弾性係数および断面二次モーメントを表す。

各 Finger が平面内でのみ振動し、かつ対象物と弾性はりは常に接触しているものと仮定するとその運動方程式は

$$[\rho A_i(x) + m_i \delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI_i(x) (1 + \gamma_i \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2}] = M_{pi} [\delta'(x) - \delta'(x-a)] - F_{si}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

と表される。ここに γ_i は Finger i の内部減衰係数、 M_{pi} は圧電素子の曲げ発生モーメント、 $\delta(\cdot)$ は Dirac のデ

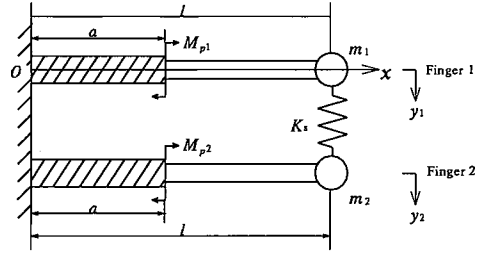


Fig. 1 Geometry of problem and coordinate.

ルタ関数であり $\delta'(\cdot) = d\delta/dx$ である。さらに Finger i の $x = l$ に相互作用する力 F_{si} は

$$F_{si} = (-1)^{i+1} K_s [y_1(x, t) - y_2(x, t)] \delta(x-l) \quad (3)$$

のように与えられる。以下の解析ではさらに二本の指は同形同質であるとする。この場合パラメータは

$$\rho A_1(x) = \rho A_2(x) \equiv \rho A(x),$$

$$EI_1(x) = EI_2(x) \equiv EI(x),$$

$$m_1 = m_2 \equiv m, \quad \gamma_1 = \gamma_2 \equiv \gamma \quad (4)$$

となる。式 (1), (3) および (4) を式 (2) に代入すると、本解析で取り扱う二本指機構の運動方程式は

$$[\rho A(x) + m \delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI(x) (1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2}] + (-1)^{i+1} K_s [y_1(x, t) - y_2(x, t)] \delta(x-l) = M_{pi} [\delta'(x) - \delta'(x-a)], \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

となる。各 Finger は弾性はりを取り付けた位置で断面が不連続であり、各等断面積部を固定端側からそれぞれ $j=I, II$ とする。系の複素固有角振動数を p で振動するものとし、式 (5) の自由振動の解を次のように置く。

$$y_i(x, t) = W_i^j(x) e^{pt}, \quad i = 1, 2, \quad j=I, II. \quad (6)$$

式 (6) を式 (5) の右辺を零とおいた式に代入しラプラス変換して得られた式を整理し逆変換する。ここで、 W_1^j および W_2^j は

$$W_1^j = W_s^j + W_a^j,$$

$$W_2^j = W_s^j - W_a^j, \quad j=I, II \quad (7)$$

である。また、 W_s^j は Finger $i (= 1, 2)$ の同位相 (symmetric) モード、 W_a^j は逆位相 (asymmetric) モードを示し、各々次式で表される。

$$W_s^j = A_s^j S(\xi_s^j x) + B_s^j T(\xi_s^j x) + C_s^j U(\xi_s^j x)$$

$$\begin{aligned}
& + D_s^j S(\xi_s^j x) + \frac{\alpha^4}{(\xi_s^j)^3} W_s^j(l) V[\xi_s^j(x-l)] H(x-l), \\
& W_a^j = A_a^j S(\xi_a^j x) + B_a^j T(\xi_a^j x) + C_a^j U(\xi_a^j x) \\
& + D_a^j S(\xi_a^j x) + \frac{\beta^4}{(\xi_a^j)^3} W_a^j(l) V[\xi_a^j(x-l)] H(x-l), \\
& j = \text{I, II}. \tag{8}
\end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned}
\xi_s^4 &= -\frac{(\rho A)^2 p_s^2}{(EI)^2(1+\gamma p_s)}, \quad \alpha^4 = -\frac{m p_s^2}{E_b I_b(1+\gamma p_s)} \\
\xi_a^4 &= -\frac{(\rho A)^2 p_a^2}{(EI)^2(1+\gamma p_a)}, \quad \beta^4 = -\frac{m p_a^2 + 2K_s}{E_b I_b(1+\gamma p_a)}, \\
(\rho A)^I &= \rho_p A_p, \quad (\rho A)^{II} = \rho_b A_b, \\
(EI)^I &= E_p I_p, \quad (EI)^{II} = E_b I_b, \\
S(\xi x) &= \frac{1}{2}[\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)], \\
T(\xi x) &= \frac{1}{2}[\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)], \\
U(\xi x) &= \frac{1}{2}[\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)], \\
V(\xi x) &= \frac{1}{2}[\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)], \\
j &= \text{I, II}. \tag{9}
\end{aligned}$$

固有値 ξ_s^j , ξ_a^j および未定係数 $A_s^j \sim D_s^j, A_a^j \sim D_a^j$ は Finger 1 と Finger 2 の境界条件, および要素 $j=\text{I, II}$ において変位, 傾き, モーメントおよびせん断力が連続である条件を用いて決定される。ここで式 (8), (9) における $H(\cdot)$ はヘビサイドのユニットステップ関数および p_s および p_a はそれぞれ同位相モードおよび逆位相モードの複素固有角振動数を表わす。

モード関数式 (8) を境界条件に代入するとマトリックスで表わされる連立 1 次方程式

$$TX = 0 \tag{10}$$

が得られる。ここに $X = [C^I D^I A^{II} B^{II} C^{II} D^{II}]^T$ および $T = [t_{ij}]$ であり, マトリックスの成分は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}
t_{11} &= U(\xi_s^I a), & t_{12} &= V(\xi_s^I a), \\
t_{13} &= -S(\xi_s^I a), & t_{14} &= -T(\xi_s^I a), \\
t_{15} &= -U(\xi_s^{II} a), & t_{16} &= -V(\xi_s^{II} a), \\
t_{21} &= \xi_s^I T(\xi_s^I a), & t_{22} &= \xi_s^I U(\xi_s^I a), \\
t_{23} &= -\xi_s^{II} V(\xi_s^{II} a), & t_{24} &= -\xi_s^{II} S(\xi_s^{II} a), \\
t_{25} &= -\xi_s^{II} T(\xi_s^{II} a), & t_{26} &= -\xi_s^{II} U(\xi_s^{II} a), \\
t_{31} &= (EI)_{bp}(\xi_s^I)^2 S(\xi_s^I a), & t_{32} &= (EI)_{bp}(\xi_s^I)^2 T(\xi_s^I a), \\
t_{33} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^2 U(\xi_s^I a), & t_{34} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^2 V(\xi_s^I a), \\
t_{35} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^2 S(\xi_s^I a), & t_{36} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^2 T(\xi_s^I a), \\
t_{41} &= (EI)_{bp}(\xi_s^I)^3 V(\xi_s^I a), & t_{42} &= (EI)_{bp}(\xi_s^I)^3 S(\xi_s^I a), \\
t_{43} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^3 T(\xi_s^I a), & t_{44} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^3 U(\xi_s^I a), \\
t_{45} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^3 V(\xi_s^I a), & t_{46} &= -E_b I_b(\xi_s^I)^3 S(\xi_s^I a), \\
t_{51} &= 0, & t_{52} &= 0, \\
t_{53} &= U(\xi_s^{II} l), & t_{54} &= V(\xi_s^{II} l), \\
t_{55} &= S(\xi_s^{II} l), & t_{56} &= T(\xi_s^{II} l), \\
t_{61} &= 0, & t_{62} &= 0, \\
t_{63} &= T(\xi_s^{II} l) + \frac{\rho}{(\xi_s^{II})^3} S(\xi_s^{II} l), & t_{64} &= U(\xi_s^{II} l) + \frac{\rho}{(\xi_s^{II})^3} T(\xi_s^{II} l), \\
t_{65} &= V(\xi_s^{II} l) + \frac{\rho}{(\xi_s^{II})^3} U(\xi_s^{II} l), & t_{66} &= S(\xi_s^{II} l) + \frac{\rho}{(\xi_s^{II})^3} V(\xi_s^{II} l).
\end{aligned}$$

$$i = s, a. \tag{11}$$

式 (10) において $|T| = 0$ を解くと固有値 ξ_s^j , ξ_a^j を求め, また式 (9) に代入し同位相モードおよび逆位相モードの複素固有角振動数 p_s および p_a が決定される。さらに式 (10) より得られた $A_s^j \sim D_s^j$ および $A_a^j \sim D_a^j$ を式 (8) に代入することによりモード関数 W_s^j および W_a^j が決定される。

得られたモード関数 W_s^j および W_a^j を用いて式 (5) の解を

$$\begin{aligned}
y_i(x, t) &= \sum_{n=1}^N W_{sn}^j(x) f_{sn}(t) \\
&+ (-1)^{i+1} \sum_{n=1}^N W_{an}^j(x) f_{an}(t), \\
i &= 1, 2, \quad j = \text{I, II} \tag{12}
\end{aligned}$$

とおく。ここに, $W_{sn}(x)$ と $W_{an}(x)$ は n 次の同位相および逆位相モード関数であり, f_{sn} と f_{an} はそれぞれに対応する時間関数である。また, N は解析で考慮する近似項数を表わす。式 (12) を式 (5) に代入し, 得られた式にガレルキン法を適用し整理すると以下のマトリックス方程式が得られる。

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma\dot{F}(t) + KF(t) = QM_p(t), \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
M &= \begin{bmatrix} M_s & O \\ O & M_a \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_s & O \\ O & K_a \end{bmatrix}, \\
\Gamma &= \begin{bmatrix} \Gamma_s & O \\ O & \Gamma_a \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_s \\ Q_a \end{bmatrix}, \\
F &= [F_s \quad F_a]^T.
\end{aligned} \tag{14}$$

ここに, F_s , M_s , Γ_s , K_s , Q_s , F_a , M_a , Γ_a , K_a , Q_a および M_p のマトリックスの要素はそれぞれ

$$\begin{aligned}
F_s &= [f_{s1} \ f_{s2} \dots f_{sN}], \\
M_{sij} &= \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{sj}(x) W_{si}(x) dx, \\
\Gamma_{sij} &= \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx, \\
K_{sij} &= \int_0^l EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx, \\
i, j &= 1, 2, \dots, N, \\
Q_{sij} &= \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] w_{si}(x) dx / 2, \\
i &= 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \\
F_a &= [f_{a1} \ f_{a2} \dots f_{aN}], \\
M_{aij} &= \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{aj}(x) W_{ai}(x) dx, \\
\Gamma_{aij} &= \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4} W_{ai}(x) dx, \\
K_{aij} &= \int_0^l [EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4}
\end{aligned}$$

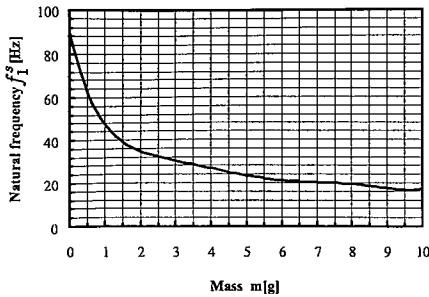


Fig. 2 Variation of first natural frequency of symmetric mode with increasing grasped object mass(theoretical results).

$$\begin{aligned}
 &+ 2K_s W_{aj}(x)\delta(x-l)W_{ai}(x)dx, \\
 & i, j = 1, 2, \dots, N, \\
 Q_{aij} = & \begin{cases} \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)]w_{ai}(x)dx/2, & j = 1 \\ -\int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)]w_{ai}(x)dx/2, & j = 2 \end{cases} \\
 & i = 1, 2, \dots, N, \\
 M_p = & [M_{p1} \ M_{p2}]^T. \tag{15}
 \end{aligned}$$

である。Finger 1 と Finger 2 を以下、デジタル制御系で駆動制御することとする。連続時間系の入力をサンプリング周期 T 間で一定と見做すとき、式 (13) は 0 次ホールダ近似を用いた離散時間系の状態方程式に変換される。

2.2 対象物の質量と剛性の評価

二つの Finger が対象物と接触した状態でひずみゲージの出力を読み、機構の同位相および逆位相の二つのモードの固有振動数より対象物の質量と剛さを求める原理を、以下に示す。まず、同位相の 1 次モードおよび逆位相の 1 次モードの固有値を特性方程式 $|T| = 0$ より求めておく。さらに得られた各固有値を式 (9) に代入することにより $p_s (= R_s + iI_s)$ および $p_a (= R_a + iI_a)$ が求められる。その場合、同位相および逆位相モードの固有振動数は

$$f_1^i = I_i/2\pi, \quad i = s, a, \tag{16}$$

と与えられる。

次に、弾性はり上のひずみゲージ取り付け位置を $x = l_1 \sim l_2$ 、弾性はりの厚さを h とすると、ゲージの

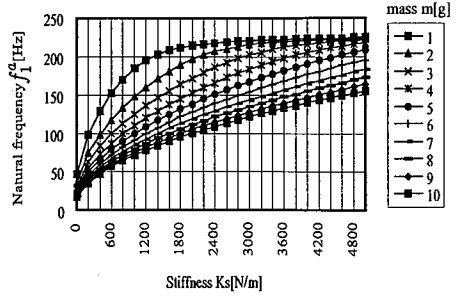


Fig. 3 Variation of first natural frequency of anti-symmetric mode with increasing object mass and stiffness(theoretical results).

曲げひずみは以下の平均値として与えられる。

$$\epsilon_i = \frac{h}{2(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial^2 y_i(x,t)}{\partial x^2} dx, \quad i = 1, 2. \tag{17}$$

上式において、変位関数 $y_i(x,t)$ は式 (12) で与えられる。ひずみゲージ信号 ϵ_i に含まれる 1 次の同位相および逆位相モードの振動数はパワースペクトル解析によりパワースペクトルのピーク値振動数として与えられる。これより、把持対象物の質量 m と剛さ K_s が以下のように求まる。

図 2 は把持物体の質量 m と 1 次の同位相モードの固有振動数 f_1^s の関係を示す。これより、把持物体の質量 m は f_1^s の関数として以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 f_1^s(m) = & 4.76 \times 10^{-10}m^6 - 1.91 \times 10^{-7}m^5 \\
 & + 3.17 \times 10^{-5}m^4 - 2.79 \times 10^{-3}m^3 \\
 & + 0.1393m^2 - 3.7735m + 45.0568, \\
 m = & f^{-1}(f_1^s(m)). \tag{18}
 \end{aligned}$$

なお、実験公式を求めるに際しては 5 次以下の近似を行うと誤差が大きくなることが分かっている⁽¹¹⁾。このため本研究では 6 次近似を使用した。また、同位相モードでは二本指が同振幅で同方向に振動するためばね K_s は変形せず、したがって振動数は把持物体の質量 m のみに影響される。

図 3 は把持物体の質量 m と剛さ K_s の変化による 1 次の逆位相モードの固有振動数の変化を、 m の 1g おきの値について示したものである。逆位相モードの固有振動数は把持物体の質量 m と剛さ K_s の関数として変化する。すなわち

$$K_s = g(m, f_1^a). \tag{19}$$

Table 1 Physical parameters of Fingers.

Property	Piezoelectric cell	Cu-beam
Length [m]	31.8×10^{-3}	36.2×10^{-3}
Width [m]	12.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}
Density ρ [kg/m^3]	8.3×10^3	8.67×10^3
Young's modulus E [N/m^2]	58.03×10^9	102.5×10^9
Damping coefficient γ [s]	3.5787×10^{-5}	

K_s は種々の m と f_1^a の値に対して求めておき、データベースとして保存しておく。なお、 $K_s = 0$ の場合は $f_1^a \equiv f_1^s$ となる。

把持物体の質量 m と剛さ K_s を求めるため、初めに二本指が未知の質量と剛さを有する物体を把持した状態で Finger 1 にステップ状の駆動電圧を印加する。次に、Finger 1 の弾性はり部に貼り付けられたひずみゲージ出力を読み、パワースペクトル解析により 1 次の同位相および逆位相モードに対するピーク振動数 f_1^s, f_1^a を読み取る。得られた f_1^s と図 2 あるいは式 (18) より、把持物体の質量 m が決定される。さらに m と f_1^a を用い、図 3 あるいは式 (19) より K_s が決定される。以上の作業をコンピュータ上でを行い、把持物体の質量 m と剛さ K_s が決定される。たとえば $f_1^s = 35.64\text{Hz}$ であるとする、式 (18) により対象物の質量 m が 2g と同定される。さらに f_1^a を読み、図 3 あるいは式 (19) より剛さ K_s を決定することができる。図 3 の $m = 2\text{g}$ のグラフ線より、たとえば $f_1^a = 150\text{Hz}$ は $K_s = 1000\text{N/m}$ に対応することが分かる。これより、把持物体は質量 2g、剛さ 1000N/m の物体であると同定される。なお、図 3 は質量が 1g ずつ増える場合を示しているが、実際には m のさらに細かい変化に対して同様な計算を多数回行ない、把持対象物の剛性同定に使用している。

3. 実験

本実験で使用した装置の概略を図 4 に示す。機構は大別して圧電素子で駆動される二本指機構、およびステッピングモータとボールねじで構成される開閉機構の二つよりなっている。Finger 1 の弾性はりには根元より 12.8mm ~ 14.8mm の位置に半導体ひずみゲージが貼りつけられている。さらに、Finger 2 の先端にはレーザー変位計 (KEYENCE LD2500: 分解能 0.5 μm) がモニター用として設置されている。開閉機構部ではステッピングモータを駆動し、ボールねじを回転させることで二本指の間隔を調整している。これは、本機構の圧電素子の発生変位が十分でないため先端が対象物に接触するまで指を移動させ、その後対象物を把持しアクティブセンシングを行うためである。

本実験で使用した各指の物性値を表 1 に示す。また表 2 に $m = 3.6\text{g}$ の硬い対象物 ($K_s = \infty$) を把持させ

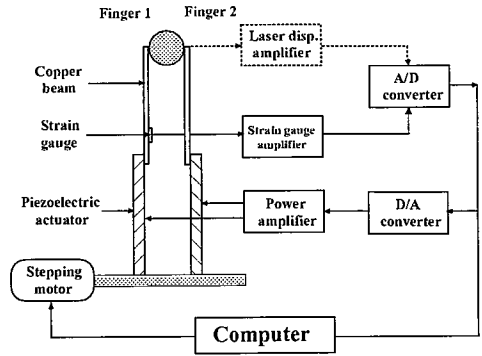


Fig. 4 Experimental setup for active sensing.

Table 2 Theoretical and experimental natural frequencies of 1st symmetric mode ($m = 3.6\text{g}$).

	Theoretical value	Experimental value
1st mode	27.48[Hz]	27.78[Hz]

た場合の二本指機構の 1 次同位相モードの固有振動数を示す。理論値と実験値は良く対応しており、本解析モデルが妥当であることを示している。

4. 実験結果とその考察

以下、上記の理論解析において得られた同定法を実験により検証する。実験では二つの指が対象物と接触した後 Finger 1 の圧電素子に電圧を印加し、得られたひずみゲージ出力に対してパワースペクトル解析⁽¹¹⁾を行う。両 Finger に同一の駆動電圧を加えた場合は同位相モードの振動が発生しないため、ここでは Finger 1 へのみステップ状の駆動電圧を印加し二本指機構を駆動する。以下、サンプリング周期を 2 msec として実験を行った。

図 5 に、二本指機構がベアリングボールを把持した時のひずみゲージ出力のパワースペクトル密度を示す。実験による同位相 1 次モードのピーク振動数 f_1^s は 32.9Hz であり、対応する対象物の質量は 2.55g と見積られる。一方、実際に測定した対象物の質量は 2.61g であった。対象物の剛性を求めるための逆位相 1 次モードのピーク振動数 f_1^a は把持物が剛体 ($K_s = \infty$) と見なされる場合、一端固定他端単純支持の境界条件によって計算するとおおよそ 230Hz であるが、図に示したスペクトル解析図には明白に現われていない。これは $K_s = \infty$ の場合 f_1^a の振動モードが十分に大きく現われていないためである。

図 6 は柔らかい対象物としてスポンジの小立方体を把持した場合のひずみゲージ出力のパワースペク

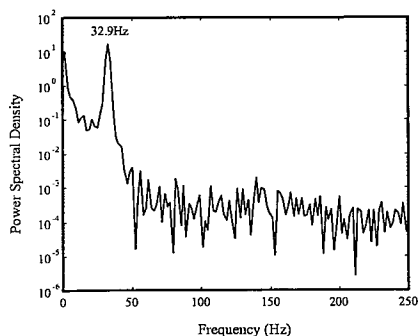


Fig. 5 Power spectral density for a rigid object(steel ball).

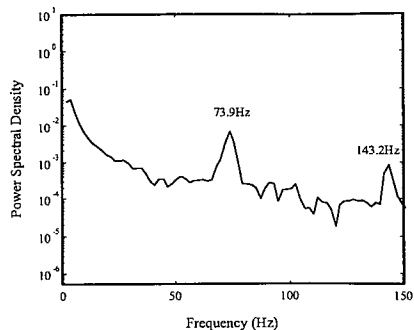


Fig. 7 Power spectral density for a soft object (salmon roe).

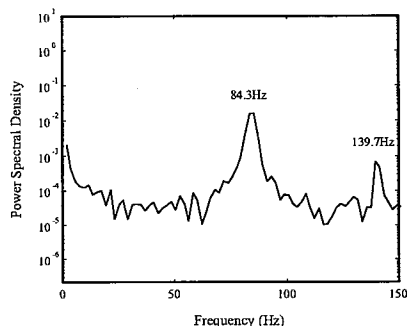


Fig. 6 Power spectral density for a soft object (sponge rubber block).

トル密度である。図より、1次の同位相および逆位相モードの振動数は $f_1^i=84.3\text{Hz}$ および $f_1^o=139.7\text{Hz}$ であり、上述の同定法にしたがって質量と剛性を求めると $m=0.056\text{g}$, $K_s=126\text{N/m}$ と同定される。これに対して静的荷重理論により得られた剛性 K_s は 145N/m 、測定質量は 0.06g であった。質量と剛性について実験と理論の間に差があるのは、柔らかい対象物の場合把持部表面の局部的変形が同定値に影響するためと思われる。

図7は、実際の剛性測定が難しい対象物としてサケのイクラを把持した場合の結果を示す。図より振動数 f_1^i および f_1^o は $f_1^i=73.9\text{Hz}$, $f_1^o=143.2\text{Hz}$ と求められ、これより質量は 0.191g 、剛性は 189N/m と見積られる。

以上の結果は、二本指機構のひずみゲージ出力を用いて対象物の質量と剛性を十分な程度で同定できることを示している。

5. 結 言

二本指機構の把持動作を用いて微小対象物の質量と

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以下のようになる。

1. 対象物を把持した場合の機構の同位相モードと逆位相モードの1次固有振動数をひずみゲージ出力として測定することにより対象物の質量と剛性を十分な精度で同定することが可能である。
2. 本法を用いて、一般に測定の難しいイクラ等の剛性が比較的容易に同定可能である。
3. 二本指機構を用いることで一つのセンサ（ひずみゲージ）から複数の情報が抽出できることより、二本指機構はアクティブセンシングに使用可能である。

文 献

- (1) 三輪, 計測と制御, 26, 3, (1987)219-220.
- (2) 岡本, 日本ロボット学会誌, 12, 7, (1994)960-965.
- (3) 舟橋ら, 日本機械学会論文集 C 編, 61, 589, (1995)163-169.
- (4) 金子, 計測と制御, 35, 4, (1996)274-277.
- (5) 向井, 石川, 日本ロボット学会誌, 15, 1, (1997)75-81.
- (6) 上野ら, 日本ロボット学会誌, 15, 1, (1997)61-67.
- (7) 今村ら, 日本機械学会論文集 C 編, 62, 600, (1996)241-247.
- (8) 日野ら, 日本ロボット学会誌, 15, 1, (1997)68-74.
- (9) S.Chonan, Z.W. Jiang and M.Koseki, Soft-handling gripper driven by piezoceramic bimorph strips, Smart Mater. Struct., 5(1996), 407-414.
- (10) 江ら, 日本機械学会論文集 C 編, 62, 597, (1996)1773-1780.
- (11) Signal processing toolbox user's guide, The Math Works, Inc., (1994).