

圧電素子で駆動される二本指機構によるアクティブ センシングの研究 (柔軟微小対象物の質量と剛性の同定)

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

○金永喆*, 長南征二*, 江 鐘偉*

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

*東北大学工学部

*Tohoku University

キーワード: アクティブセンシング(active Sensing), 小型把持機構(miniature Gripper),
圧電素子(piezo-Actuator), 把持(grasping), 同定(identification)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学工学部 機械電子工学科 長南研究室
Kim, Young-Chul, Tel.: (022)217-5879, Fax.: (022)217-5879, E-mail: kim@rose.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

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か行われている。舟橋ら⁽³⁾はハンドに適当な検出動作をさせ、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,

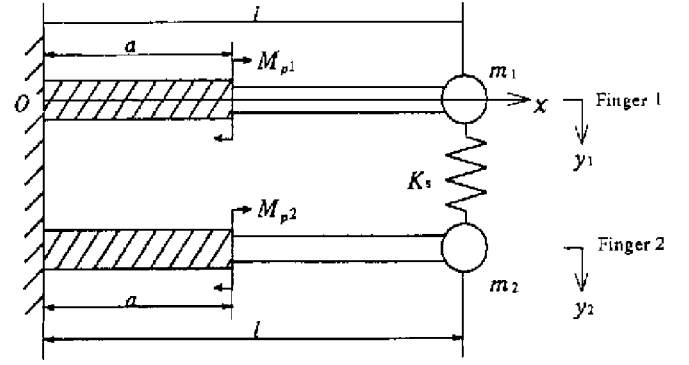


Fig. 1 Geometry of problem and coordinate.

断面積, 縦弾性係数および断面二次モーメントを表わす。

各Fingerが平面内でのみ振動し, かつ対象物と弾性はりと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。

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

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。さらに系の固有振動モード波形は

$$\begin{aligned} W_1^j &= W_2^j = W_s^j, \\ W_1^j &= -W_2^j = W_a^j, \quad j = \text{I, II} \end{aligned} \quad (7)$$

と求まる。ここに W_s^j はFinger $i(=1, 2)$ の同位相モード(symmetric), W_a^j は逆位相モード(asymmetric)を表わし、各々次式で表される。

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

ここに

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

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=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、 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

$$TX = 0 \quad (10)$$

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。

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

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

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

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

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。

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

$$M = \begin{bmatrix} M_s & O \\ O & M_a \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_s & O \\ O & K_a \end{bmatrix}, \\ \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_s & O \\ O & \Gamma_a \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_s \\ Q_a \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$F = [F_s \quad F_a]^T.$$

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

$$F_s = [f_{s1} \ f_{s2} \ \dots \ f_{sN}], \\ M_{sij} = \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{sj}(x) W_{si}(x) dx, \\ \Gamma_{sij} = \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx, \\ K_{sij} = \int_0^l EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx, \\ i, j = 1, 2, \dots, N, \\ Q_{sij} = \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] w_{si}(x) dx / 2, \\ i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \\ F_a = [f_{a1} \ f_{a2} \ \dots \ f_{aN}], \\ M_{aij} = \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{aj}(x) W_{ai}(x) dx, \\ \Gamma_{aij} = \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4} W_{ai}(x) dx, \\ K_{aij} = \int_0^l [EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4} \\ + 2K_s W_{aj}(x) \delta(x-l)] W_{ai}(x) dx, \\ i, j = 1, 2, \dots, N, \\ Q_{aij} = \begin{cases} \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] w_{ai}(x) dx / 2, & j = 1 \\ - \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] w_{ai}(x) dx / 2, & j = 2 \end{cases} \\ i = 1, 2, \dots, N, \\ M_p = [M_{p1} \ M_{p2}]^T. \quad (15)$$

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 次ホールド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(8)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

$$f_i^i = I_i / 2\pi, \quad i = s, a. \quad (16)$$

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、ゲージの曲げひずみは以下の平均値として与えられる。

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

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。

$$f_1^s(m) = 4.76 \times 10^{-10} m^5 - 1.91 \times 10^{-7} m^5 \\ + 3.17 \times 10^{-5} m^4 - 2.79 \times 10^{-3} m^3 \\ + 0.1393 m^2 - 3.7735 m + 45.0568, \\ m = f_1^{-1}(f_1^s(m)). \quad (18)$$

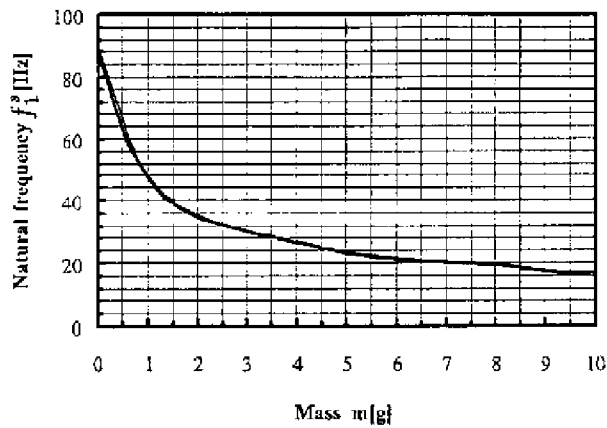


Fig. 2 Variation of first natural frequency of symmetric mode with increasing grasped object mass(theoretical results).

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

$$K_s = g(m, f_1^a). \quad (19)$$

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)

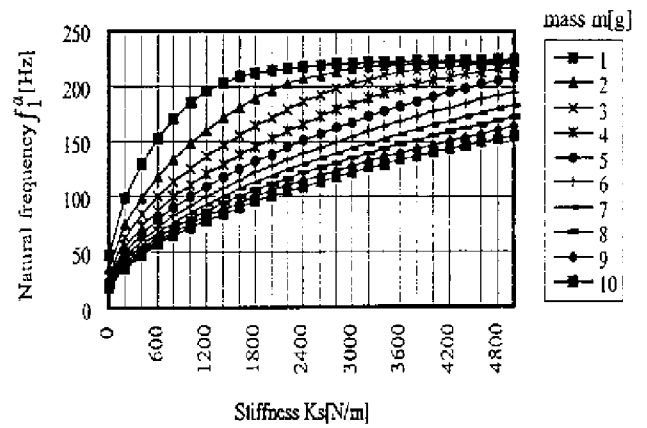


Fig. 3 Variation of first natural frequency of antisymmetric mode with increasing object mass and stiffness(theoretical results).

より K_s が決定される。以上の作業をコンピュータで行い、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 LC2100) 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、ポー

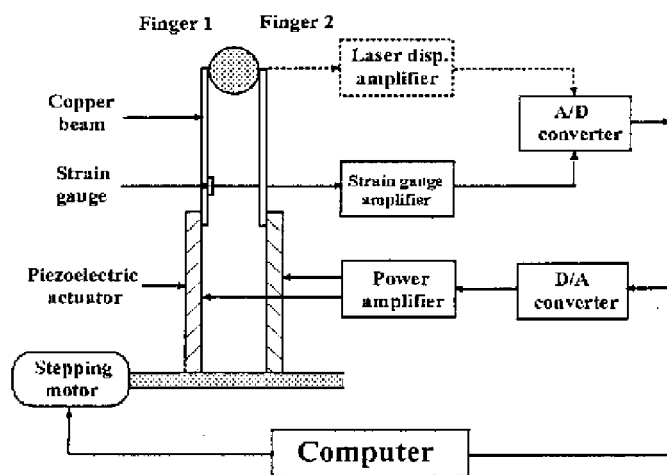


Fig. 4 Experimental setup for active sensing.

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 $m=3.6g$ の硬い対象物 ($K_s = \infty$)を把持させ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

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 [kg/m^3]	8.3×10^3	8.67×10^3
Young's modulus [N/m^2]	58.03×10^9	102.5×10^9
Damping coefficient [s]	3.5787×10^{-5}	

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

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

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Finger1に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32.3Hzであり、対応する対象物の質量は2.60g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 $f_1^s=84.3Hz$ および $f_1^a=139.7Hz$ 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 $m=0.056g$ 、 $K_s=126N/m$ 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^s および f_1^a は $f_1^s=72.5Hz$ 、 $f_1^a=142.9Hz$ と求

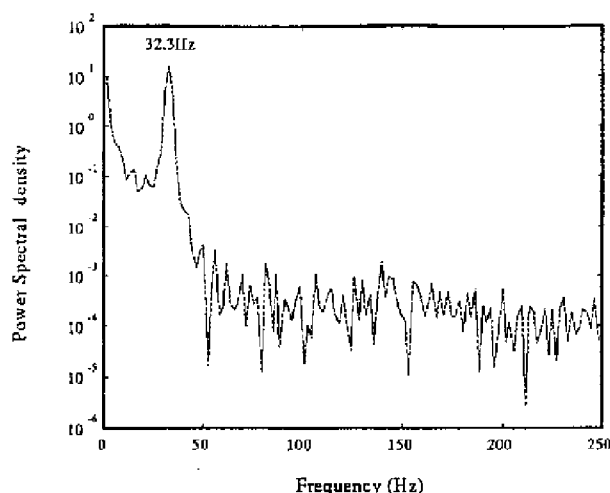


Fig. 5 Power spectral density for a rigid object(steel ball).

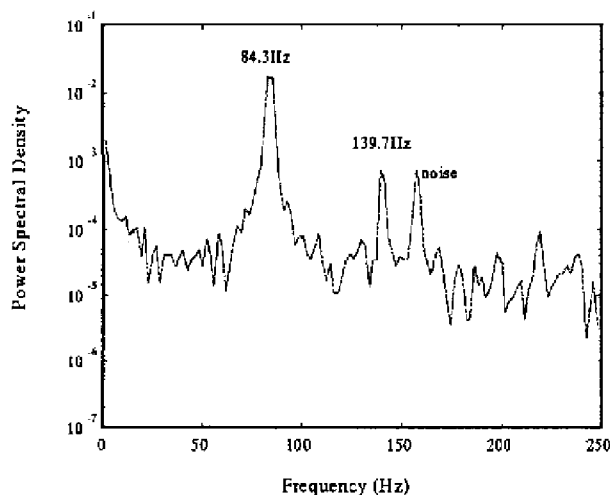


Fig. 6 Power spectral density for a soft object (sponge rubber block).

められ、これより質量は0.21g、剛性は192N/mと見積られる。

以上の結果は、二本指機構のひずみケ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. おわりに

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。

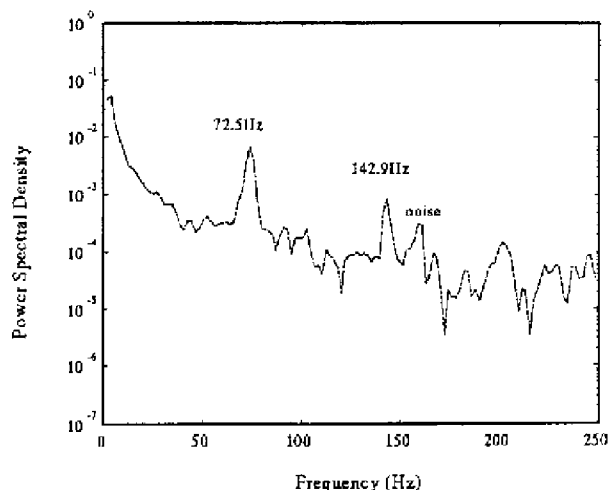


Fig. 7 Power spectral density for a soft object (salmon roe).

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ケ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(ひずみケージ)から複数の情報が抽出できることにより、二本指機構はアクティブセンシングに使用可能である。

参考文献

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