

バイモルフ型圧電素子で駆動されるソフトハンドリング・グリッパ* (第1報, 解析モデル並びに微小把持力制御)

江 鐘 偉*¹, 長 南 征 二*¹, 小 関 満*²

Development of a Soft-Handling Gripper Driven by Bimorph Piezoactuators (1st Report, Model Analysis and Minute Force Control)

Zhongwei JIANG, Seiji CHONAN and Mituru KOSEKI

This paper is a study on the minute grasping force control of a two-fingered miniature gripper driven by piezoelectric bimorph cells. The system is composed of two flexible fingers and a compact force sensor attached to the tip of one finger. Control action is implemented by two piezoelectric bimorph strips placed at the base of each finger. The theoretical model of the electromechanical system is developed and applied to the study of control problem where the gripper is commanded to grasp its object with a constant force 0.01 N at a prescribed fingertip position. The PID control algorithm is introduced to drive the gripper. The system control behaviour is examined both theoretically and experimentally.

Key Words: Mechanism, Gripper, Piezoceramic Bimorph, Force Sensor, Mathematical Model, Minute Force Control

1. 結 言

生物工学分野における組織培養や細胞融合は現在その大部分が手作業で行われており, 作業者への負担は大きく能率も十分でない. 例えばラン科の繁殖では寒天培地で生長点培養を行い, PLB(プロトコーム様体)を分離増殖させ別の培地に植え継ぎ発芽させるメリステム栽培が広く行われている. PLBは直径1mm以下と非常に小さく個体差のある微小な細胞群であり, その培地への移植作業を行うにはPLBを無菌的に傷つけること無く微小力で把持することが要求される. この作業は熟練者にとっても困難な作業であり, ロボットによる自動化および能率化が期待されている^{[1]-[4]}.

近年, 多指ハンドに関する研究^{[5]-[7]}が数多く発表されているが, そのほとんどは剛体リンクにより構成されたハンドであり, モータの動力伝達にワイヤ等の非線形性の大きな要素を用いている. このような駆動系では微細力の高精度な制御を実現することは困難であ

り, 装置の小型化にも限界をもたらす. これに対し, 岡本ら^{[2]-[3]}は形状記憶合金アクチュエータを用いたプロトコーム移植ロボットを開発した. しかし形状記憶合金は反応速度が遅い, 温度の制御をしにくい等の問題がある. Jiangら^{[8]-[10]}はフィンガを弾性体とし, バイモルフ型圧電素子の発生する曲げモーメントでフィンガを直接駆動する方法を提案し, この方法により機構が非常に単純化され, 微細力制御に適する小型軽量かつクリーンなフィンガの実現が可能となった.

本研究は著者らのこれまでの研究を発展させ, さらにバイモルフ型圧電アクチュエータおよびステッピングモータをアクチュエータとして用いる二段駆動の二本指機構を開発し, 機構のモデル解析及び把持動作の制御特性を明らかにするものである. 具体的には二本指基部をステッピングモータにより対象物と接触するまで動かし, その後フレキシブルな指先端部を圧電アクチュエータで駆動し指先の微小把持力の制御を実現する問題について, 数値解析を行い, 合わせて実験による検討を行う.

* 原稿受付 1995年10月6日.

*¹ 正員, 東北大学工学部 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉).

*² 東北大学大学院.

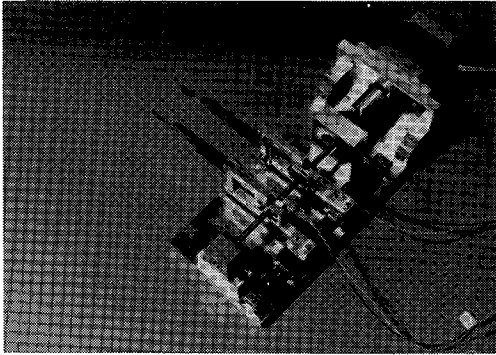


Fig.1 Parallel two-fingered gripper.

2. ソフトハンドリング二本指機構

本研究で試作したソフトハンドリング二本指機構を図1に示す。機構はバイモルフ型圧電素子をアクチュエータとする2本の銅製フレキシブルはりからなる把持部、およびステッピングモータと閉閉ボールネジで構成される閉閉機構部からなる。バイモルフ型圧電素子は微細な変位・力制御に適したアクチュエータであるが、その先端の発生変位はおよそ300μm程度と非常に小さい。このため、多少大きな対象物を掴む機構のアクチュエータとしては十分でない。そこで本機構では始めにステッピングモータを駆動し、精密閉閉ボールネジ(TSS:FBS0401)を介して両指が対象物に接触するまで指を移動、その後バイモルフ型圧電素子を駆動し指先の微小把持力制御を実現する。試作した機構は、ステッピングモータへの入力1パルスあたりの閉閉量5μmを実現している。圧電素子の速応性と指先に付けられた柔軟触覚センサの吸振性により、対象物との衝突により生じた振動の影響は以後の制御ではほぼ無視できるため、本報では主に両指が対象物と接触した状態からの把持動作および微小力制御について、理論と実験による検討を行う。

3. モデル化及び理論解析

二本指機構のモデルを図2に示す。二本指の指先端部を小形弾性はりとし、はりの根元にアクチュエータとしてバイモルフ型圧電素子をおき、それぞれの指を Finger1, Finger2 とする。さらに Finger1 の先端には柔軟触覚センサが取り付けられている。図において K_s はセンサと把持物体全体の等価ばね定数を表す。また、センサと物体の全質量は両指の先端に集中質量として振り分け、それぞれ m_1, m_2 として表す。以下、圧電素子に電圧を印加し素子を曲げ変形させることで指を駆動し、両指の先端発生力と位置の制御問題について解析

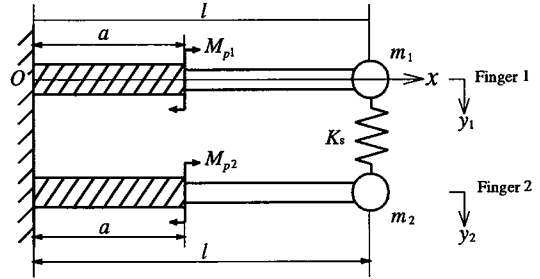


Fig.2 Geometry of problem and coordinates.

を行う。二本の指は各にセラミック圧電素子と薄弾性はりの二要素からなることより、Finger i ($i=1, 2$) の単位長さあたりの質量 $\rho A_i(x)$ 、曲げ剛性 $EI_i(x)$ は次のように表される。

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

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

$i = 1, 2 \dots \dots \dots (1)$

上式において ρ_p^i, A_p^i, E_p^i および I_p^i は Finger i の圧電素子の密度、断面積、縦弾性係数および断面二次モーメントであり、 ρ_b^i, A_b^i, E_b^i および I_b^i は Finger i の弾性はり部の密度、断面積、縦弾性係数および断面二次モーメントである。さらに Finger i の内部減衰を γ_i とすると、圧電素子を有する Finger i の運動方程式は

$$[\rho A_i(x) + m_i \delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI_i(x) (1 + \gamma_i \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2}] = M_{pi} [\delta'(x-0) - \delta'(x-a)] - F_{si}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

となる。上式において y_i は指の横変位、 M_{pi} は圧電素子の発生モーメント、 $\delta(\cdot)$ はディラクのデルタ関数であり、 $\delta'(\cdot) = d\delta/dx$ である。さらに F_{si} はセンサを介して Finger2, Finger1 に作用する力であり、

$$F_{s1} = K_s [y_1(x, t) - y_2(x, t)] \delta(x-l) \dots \dots (3)$$

のように与えられる。以下では二本指を同質、同形である場合を取り上げることとし、パラメータを

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

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

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

と置く。式(3)および(4)を式(2)に代入すると各指の

運動方程式は

$$[\rho A(x) + m\delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI(x)(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_1}{\partial x^2}] + K_s [y_1(x,t) - y_2(x,t)] \delta(x-l) = M_{p1} [\delta'(x-0) - \delta'(x-a)], \dots \dots \dots (5)$$

$$[\rho A(x) + m\delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI(x)(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_2}{\partial x^2}] + K_s [y_2(x,t) - y_1(x,t)] \delta(x-l) = M_{p2} [\delta'(x-0) - \delta'(x-a)] \dots \dots \dots (6)$$

となる。

圧電素子を有するフレキシブルフィンガを段付きはりと考えて、固定端側から $j = I, II$ と番号を付け、式(5)および(6)の解を

$$y_1(x,t) = \sum_{n=1}^N W_{sn}^j(x) f_{sn}(t) + \sum_{n=1}^N W_{an}^j(x) f_{an}(t) \quad ,$$

$$y_2(x,t) = \sum_{n=1}^N W_{sn}^j(x) f_{sn}(t) - \sum_{n=1}^N W_{an}^j(x) f_{an}(t) \quad ,$$

$j = I, II, \dots \dots \dots (7)$

とおく。ここに $W_{sn}(x)$ および $W_{an}(x)$ はそれぞれ二本指が同位相および逆位相で振動する場合のモード関数であり、位置座標に関するラプラス変換法を用いて以下のように求まる。

$$W_s^j(x) = A_s^j S(\xi_s^j x) + B_s^j T(\xi_s^j x) + C_s^j U(\xi_s^j x) + D_s^j V(\xi_s^j x) + \frac{\alpha^4}{(\xi_s^j)^3} W_s^j(l) V[\xi_s^j(x-l)] H(x-l),$$

$$W_a^j(x) = A_a^j S(\xi_a^j x) + B_a^j T(\xi_a^j x) + C_a^j U(\xi_a^j x) + D_a^j V(\xi_a^j x) + \frac{\beta^4}{(\xi_a^j)^3} W_a^j(l) V[\xi_a^j(x-l)] H(x-l),$$

$j = I, II, \dots \dots \dots (8)$

ここに

$$(\xi_s^j)^4 = -\frac{(\rho A)^j p_s^2}{(EI)^j (1 + \gamma p_s)}, \quad \alpha^4 = -\frac{m p_s^2}{E_b I_b (1 + \gamma p_s)},$$

$$(\xi_a^j)^4 = -\frac{(\rho A)^j p_a^2}{(EI)^j (1 + \gamma p_a)}, \quad \beta^4 = -\frac{m p_a^2 + 2K_s}{E_b I_b (1 + \gamma p_a)},$$

$$S(\xi x) = \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)],$$

$$T(\xi x) = \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)],$$

$$U(\xi x) = \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)],$$

$$V(\xi x) = \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)] \dots \dots \dots (9)$$

であり、 $H(\cdot)$ はステップ関数、 p_s および p_a はそれぞれ同位相モード、逆位相モードの複素固有角振動数である。固有値 ξ_s^j, ξ_a^j および未定係数 $A_s^j \sim D_s^j, A_a^j \sim D_a^j$ はフレキシブルフィンガの境界条件、および要素間において変位、傾き、モーメントおよびせん断力が連続であることにより決定される。

式(7)を式(5)および(6)に代入しガレルキン法を適用すると以下の二つのマトリックス方程式が得られる。

$$M_s \ddot{F}_s(t) + \Gamma_s \dot{F}_s(t) + K_s F_s(t) = Q_s M_p(t), \quad \cdot (10)$$

$$M_a \ddot{F}_a(t) + \Gamma_a \dot{F}_a(t) + K_a F_a(t) = Q_a M_p(t) \quad \cdot (11)$$

ここに $F_s = [f_{s1} \ f_{s2} \dots f_{sN}]^T, F_a = [f_{a1} \ f_{a2} \dots f_{aN}]^T, M_p = [M_{p1} \ M_{p2}]^T$ であり、 M_s, Γ_s, K_s, Q_s および M_a, Γ_a, K_a, Q_a のマトリックスの要素はそれぞれ

$$M_{sij} = \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{sj}(x) W_{si}(x) dx,$$

$$\Gamma_{sij} = \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx,$$

$$K_{sij} = \int_0^l EI(x) \frac{\partial^4 W_{sj}(x)}{\partial x^4} W_{si}(x) dx,$$

$i, j = 1, 2, \dots, N, \dots \dots \dots (12)$

$$Q_{sij} = \frac{1}{2} \int_0^l [\delta'(x-0) - \delta'(x-a)] W_{si}(x) dx,$$

$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots (13)$

$$M_{aij} = \int_0^l [\rho A(x) + m\delta(x-l)] W_{aj}(x) W_{ai}(x) dx,$$

$$\Gamma_{aij} = \int_0^l \gamma EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4} W_{ai}(x) dx,$$

$$K_{aij} = \int_0^l [EI(x) \frac{\partial^4 W_{aj}(x)}{\partial x^4} + 2K_s W_{aj}(x) W_{ai}(x) \delta(x-l)] dx,$$

$i, j = 1, 2, \dots, N, \dots \dots \dots (14)$

$$Q_{aij} = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] W_{ai}(x) dx & j = 1, \\ \frac{1}{2} \int_0^l [\delta'(x-a) - \delta'(x)] W_{ai}(x) dx & j = 2, \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots, N \dots \dots \dots (15)$

で与えられる。式(10)と(11)をまとめて表すと次式のようなになる。

$$M \ddot{F}(t) + \Gamma \dot{F}(t) + K F(t) = Q M_p(t) \dots \dots \dots (16)$$

ただし

$$M = \begin{bmatrix} M_s & O \\ O & M_a \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_s & O \\ O & K_a \end{bmatrix},$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_s & O \\ O & \Gamma_a \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} Q_s \\ Q_a \end{bmatrix}, \dots\dots (17)$$

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

式(16)を連続時間系の状態方程式で表せば

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_p(t),$$

$$y(t) = C_c x(t) \dots\dots\dots (18)$$

となる。ここに

$$x(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ \dot{F}(t) \end{bmatrix}, y(t) = \begin{bmatrix} F_s(t) \\ y_2(l, t) \end{bmatrix},$$

$$A_c = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}Q \end{bmatrix},$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0\dots0 & 2K_s W_{a1}^{II} \dots 2K_s W_{aN}^{II} & 0\dots0 \\ W_{s1}^{II} \dots W_{sN}^{II} & -W_{a1}^{II} \dots -W_{aN}^{II} & 0\dots0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

である。以下、Finger1および2はデジタル制御系で駆動・制御することとし、連続時間系の入力 $M_p(t)$ をサンプリング周期 T 間で一定とする0次ホールド近似を用いて離散化する。この場合、式(18)はさらに次のよう書き換えられる。

$$x(k+1) = Ax(k) + BM_p(k),$$

$$y(k) = Cx(k), \dots\dots\dots (20)$$

ただし

$$A = \exp[A_c T], B = \int_0^T \exp[A_c \tau] B_c d\tau,$$

$$C = C_c. \dots\dots\dots (21)$$

4. 二本指機構システムの特徴

4.1 二本指機構のシステム構成

表1に実験で使用した二本指機構の物性値を示す。また、本実験装置の概略図を図3に示す。本装置は二本のフレキシブルフィンガで構成される機構部、指先端の力を測定する接触力センサ、Finger2の先端変位を測定するレーザー変位計、両センサの出力信号伝達に使用されるプリアンプ、圧電素子の駆動用パワーアンプ及びセンサの情報を記録解析し制御入力を発生させる制御部(A/D変換器、コンピュータ、D/A変換器)によって構成されている。先端把持力はFinger1の先端に取り付けられた接触力センサにより測定され、Finger2の

Table 1 Dimensions and properties of Finger $i(= 1, 2)$.

	Actuator	Beam
Length (mm)	31.8	36.2
Width (mm)	12.0	6.0
Thickness (mm)	0.653	0.3
Mass density ρ (kg/m ³)	8300	8670
Young's modulus E (GN/m ²)	58.03	102.5
Damping coefficient γ (s)	3.5587×10 ⁻⁵	
Object mass (kg)	0.585×10 ⁻³	
Sensor's mass (kg)	0.295×10 ⁻³	
Sensor stiffness K_s (N/m)	9.542×10 ³	

先端位置はレーザー変位計 (KEYENCE LD2500; 分解能0.5 μ m) により測定される。それぞれのセンサ出力はプリアンプで増幅後、A/D変換器 (ADTEK AB98-05A 分解能: 12bit, 出力: 8ch, 変換時間: 25 μ sec/ch) でアナログ-デジタル変換を行い、サンプリング周期 $T(=2$ msec) 毎にコンピュータ (NEC PC9801VX) に送られ制御入力を算出する。その演算結果はD/A変換器 (Interface 98DA12 分解能: 12bit, 出力: 4ch, 変換時間: 5 μ sec/ch) により ± 5 Vのアナログ信号に変換されパワーアンプに送られる。パワーアンプで増幅された信号は各圧電素子に加えられFinger1およびFinger2が駆動される。

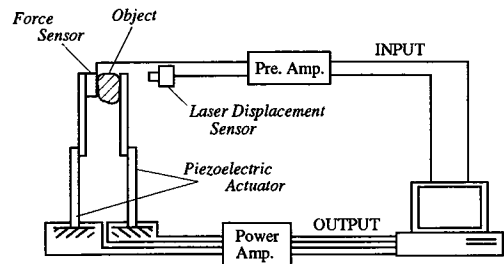


Fig.3 Experimental setup.

4.2 システムの動的特性

始めに本システムの動特性を実験により調べる。二本指機構の内部減衰率と固有振動数を求めるにあたり両フィンガが接触している状態で自由振動させ、そのときの先端変位をレーザー変位計で測定した。得られた時間応答曲線より内部減衰係数を $\gamma = 3.5587 \times 10^{-5}$ と決定し、さらにその時系列データをFFT解析し固有振動数を求めた。得られた結果を、理論解析により求められた振動数と合わせて表2に示す。理論と実験の

対応は良好であり、系のモデル化が妥当であることがわかる。

Table 2 Natural frequencies of gripper.

1st Modes	Theory	Experiment
Same phase (Hz)	48.6	48.5
Antiphase (Hz)	196.6	185.5

次に、両指の先端が接触した状態でFinger1の圧電素子にサンプリング時間2msec、振幅30Vの正弦波電圧を印加し、そのときのFinger 1先端の接触力センサ出力と、レーザー変位計からのFinger 2の先端変位出力をオシロスコープで観測した結果をそれぞれ図4, 5に示す。図4より、低振動数域では先端発生力は振動数の増加とともにほぼ直線状に減少するのに対し先端変位は0.4mm程度でほぼ一定値を維持することが分かる。

さらに駆動電圧周波数が1Hz, 10Hz, 30Hzの場合の指先応答の時間変化をそれぞれ図6～図8に示す。各図においては(a)は数値計算結果、(b)は実験結果を示している。図6より明らかなように印加電圧周波数が1Hz

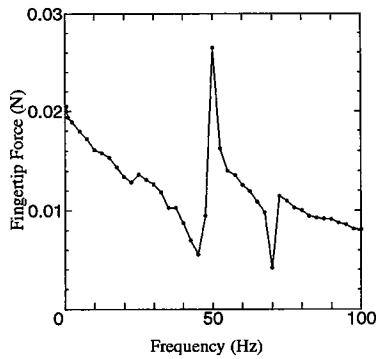


Fig.4 Frequency response of fingertip force.

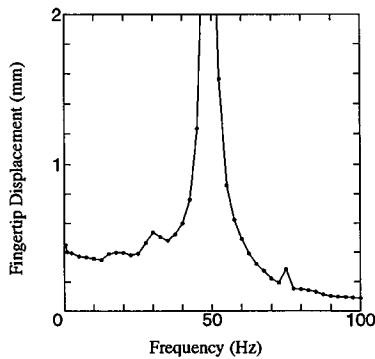


Fig.5 Frequency response of fingertip displacement.

の場合は変位、発生力とも数値計算結果と実験結果は良く一致している。一方、駆動電圧周波数が10Hz(図7)になると実験における先端発生力 F_s の振幅が数値計算結果の75%程度に、さらに周波数を30Hz(図8)に上げると F_s の実験結果は数値計算結果の60%程度にしかっていない。これは自作した圧電素子駆動用アンプが定電圧小電力用のものであり、周波数が高くなると供給電力が不足するためと考えられる。

以上の結果より、本システムをオープンループ駆動で使用する場合は低速度域で使用するべきであることが

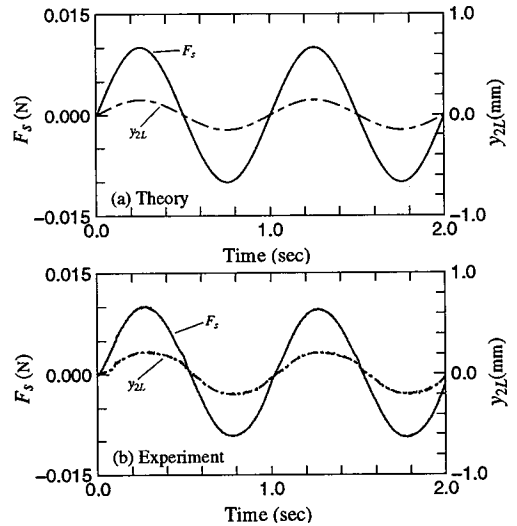


Fig.6 Time response of gripper for 1 Hz sinusoidal voltage input with amplitude 30V.

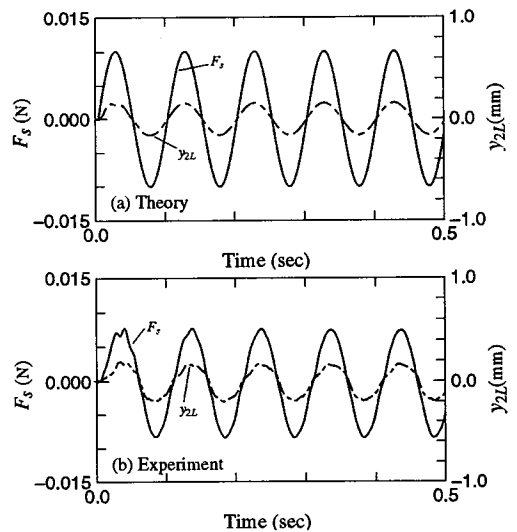


Fig.7 Time response of gripper for 10 Hz sinusoidal voltage input.

言える。

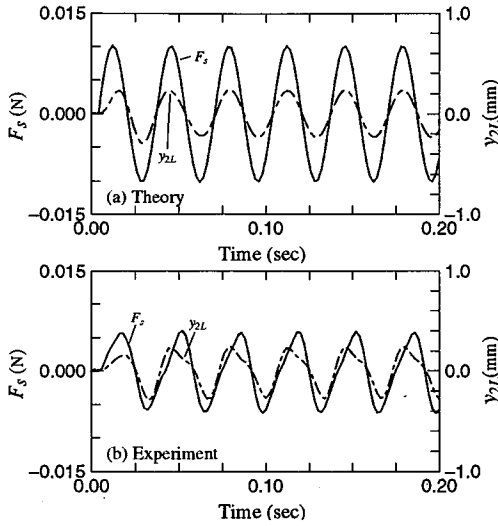


Fig.8 Time response of gripper for 30 Hz sinusoidal voltage input.

5. 二本指の把持力制御

二本指機構の把持力/先端変位並列制御を行う方法として、Finger1およびFinger2の圧電アクチュエータを駆動するモーメントを共にPIDアルゴリズムを用いて制御することを試みる。駆動・制御方法としてはFinger1を把持力フィードバック信号のみで制御しFinger2を指先の変位情報のみで駆動する方法、あるいはFinger1およびFinger2ともに把持力と先端変位信号を同時にフィードバックし制御力をする方法等が考えられる。前者の方法を採用した場合決定すべきPIDゲインの数は6個であり、後者の場合は12個となる。本研究では制御系を単純化するという観点から前者の方法を採用することとする。すなわち、Finger1については指先に取り付けられている力センサ出力信号を用いて制御し、Finger2については先端部に置かれた変位センサの出力をフィードバック信号として用い駆動することとする。

これよりFinger1を駆動する制御曲げモーメントは

$$M_{p1}(k) = G_{p1}[F_d - F_s(k)] - G_{v1}[F_s(k) - F_s(k-1)]/T + \frac{1}{2}G_{I1} \sum_{i=0}^k [2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \dots (22)$$

と与えられる。ここに F_d , F_s は把持力の目標値及び力センサの出力、さらに G_{p1} , G_{v1} 及び G_{I1} はそれぞ

れ比例、微分および積分フィードバックゲインである。同様にFinger2を駆動する制御曲げモーメントは

$$M_{p2}(k) = G_{p2}[y_d - y_{2L}(k)] - G_{v2}[y_{2L}(k) - y_{2L}(k-1)]/T + \frac{1}{2}G_{I2} \sum_{i=0}^k [2y_d - y_{2L}(i) - y_{2L}(i-1)] \dots (23)$$

と与えられる。ここに y_d , y_{2L} はFinger2の先端変位の目標値及び変位センサの出力、さらに G_{p2} , G_{v2} 及び G_{I2} はそれぞれ比例、微分および積分フィードバックゲインである。

ここでゲイン G_{pi} , G_{vi} および G_{Ii} ($i = 1, 2$) の選択手法として、閉ループ系の主要極が制御仕様で規定される極の位置に最も近づくようゲインの組合せを選ぶ極配置法を導入することとする。すなわち制御仕様より以下の方法により指定極を決定する。実際の制御系では出力 $F_s(s)$ と $y_{2L}(s)$ が式(22)および(23)を介して連成しているが、制御系の指定極を簡単に求めることを優先し、ここでは出力 $F_s(s)$ と y_{2L} は連成しないと仮定して以下の2次振動系で近似する。すなわち

$$\frac{F_s(s)}{F_d(s)} = \frac{\omega_{n1}^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}, \frac{y_{2L}(s)}{y_{2d}(s)} = \frac{\omega_{n2}^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2} \dots (24)$$

始めに、上式で表わされる系を単位ステップ目標値 F_d , y_{2d} に追従させる場合の過渡応答式が、システムに対する制御仕様 (オーバーシュート O_s , 整定時間 t_s および許容誤差 ϵ) を満たすよう、 ζ_i および ω_{ni} を以下の式より決定する。

$$O_s = \exp(-\zeta_i\pi/\sqrt{1-\zeta_i^2}) \dots (25)$$

$$t_s = -\frac{\ln \epsilon}{\zeta_i\omega_{ni}} \dots (26)$$

このとき、連続時間系における式(24)の極 $s = p'_a$ は

$$p'_{ai} = \zeta_i\omega_{ni} \pm j\sqrt{1-\zeta_i^2}\omega_{ni}, \quad i = 1, 2, \dots (27)$$

と与えられる。離散時間系におけるコントローラを設計するため p'_a をさらに

$$p_a = \exp(p'_a T) \dots (28)$$

により離散時間平面に写像し、得られた極 p_a を二本指機構の指定極として、式(20)から求められる低次モードの極がこの指定極に最も近づくよう反復計算を行い6個のPIDフィードバックゲインを決定する。

以下、対象物を目標変位零および一定把持力0.01N

で把持する問題を考える。システムの出力 F_s および y_{2L} に対しては同一の制御仕様を与えることとする。表3に各制御仕様, その指定極より得られたPIDゲイン

Table 3 Control specifications

Case	Specifications	PID Gains
1	$O_s=1(\%)$ $t_s=0.2(s)$	$G_{p1}=1.94, G_{v1}=0.09, G_{I1}=0.2$ $G_{p2}=5.1, G_{v2}=0.01, G_{I2}=6.0$
2	$O_s=1(\%)$ $t_s=0.1(s)$	$G_{p1}=2.0, G_{v1}=0.09, G_{I1}=0.37$ $G_{p2}=5.0, G_{v2}=0.01, G_{I2}=6.0$
3	$O_s=1(\%)$ $t_s=0.075(s)$	$G_{p1}=2.13, G_{v1}=0.001, G_{I1}=0.43$ $G_{p2}=4.8, G_{v2}=0.01, G_{I2}=6.2$

を示す。本機構は小さい生物や壊れやすい製品を把持することを目的としているので、把持力の大きなオーバーシュートは好ましくない。そこで制御仕様においてオーバーシュートを1%と小さい値に設定した。また許容誤差は $\epsilon = \pm 0.5\%$ としている。

表3で得られたPIDゲインを用いた場合の数値計算結果と実験結果を図9-11に示す。各図において(a)は数値計算結果, (b)は実験結果を示す。図中の細実線は把持力の目標値, 太実線は指先発生持力, 一点鎖線はFinger2の先端変位を表す。また破線はFinger1に加えらるる制御モーメント, 点線はFinger2に加えらるる制御モーメントを示す。図9は制御仕様をオーバーシュート1%, 整定時間0.2secと設定した場合の結果である。数値計算と実験結果を比べてみると把持力と先端変位

の応答とも良好に対応しており, また理論, 実験ともに指定した制御仕様を満たす結果となっている。図10は制御仕様をオーバーシュート1%, 整定時間0.1secとした場合の結果である。数値計算では把持力のオーバーシュートは1%に抑えられており, 約0.09secで目標値に収束している。先端変位も0.1secでおおむね零に収束している。一方, 実験では把持力のオーバーシュートが12%に達しており, 整定時間は把持力, 先端変位ともに0.13secとなっている。図11は制御仕様をオーバーシュート1%, 整定時間0.075secとした場合の結果である。

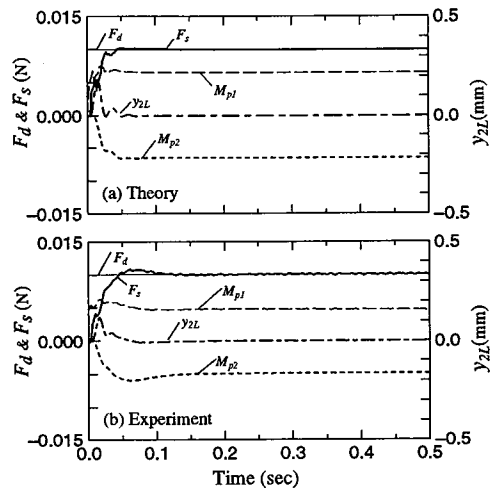


Fig.10 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with PID control of specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.1sec$. (a) Theory and (b) experiment.

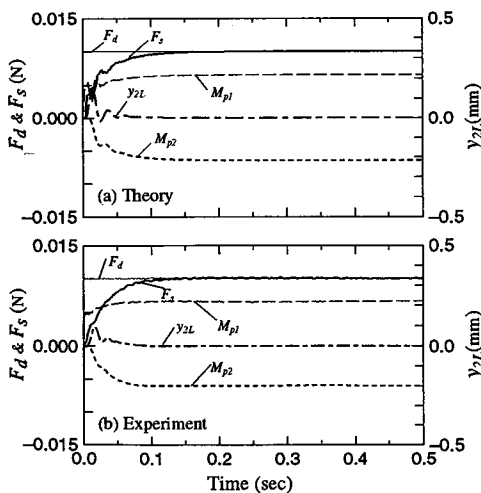


Fig.9 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with PID control of specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.2sec$. (a) Theory and (b) experiment.

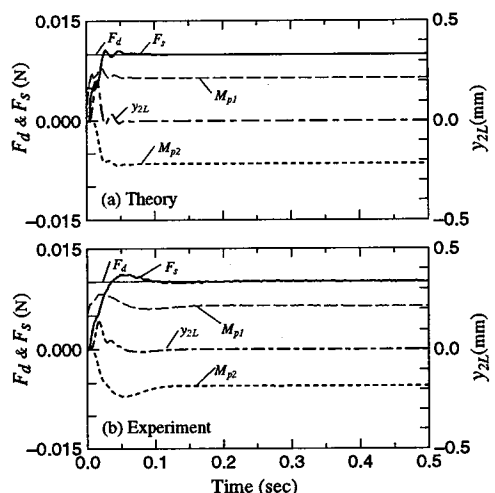


Fig.11 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with PID control of specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.075sec$. (a) Theory and (b) experiment.

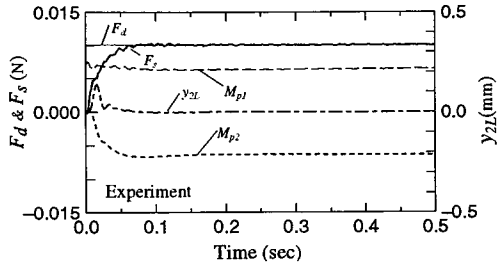


Fig.12 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} for PID control with finetuned $(G_{p1}, G_{v1}, G_{I1}) = (3.0, 0.01, 0.3)$; $(G_{p2}, G_{v2}, G_{I2}) = (4.8, 0.01, 6.2)$.

整定時間に関しては把持力および先端変位ともにほぼ0.075secを満たしているが、把持力のオーバーシュートが理論計算では5%、実験結果では10%に達する結果となっている。これは制御仕様から指定極を求める際に出力 F_s と y_{2L} とは連成しないとするモデルを用いているため、整定時間が短くなるにつれ実際の制御系とのずれが生じるためと考えられる。図12はコンピュータ上で得られたシミュレーション結果を参照に数値計算で得られたゲインに微調整を加え、実験システムの制御に用いた結果を示す。この場合オーバーシュートは2.5%と抑えられ、整定時間も把持力、先端変位ともに0.075secを満たしている。

以上の結果より、整定時間に対する要求が0.2secと緩やかな場合は、数値計算で求められた最適なPIDゲインを実験に用いることで同様な制御効果が得られることが分かる。また、整定時間に対する要求が0.1secより短くなると極配置法で求められたPIDゲインをそのまま用いただけでは設計仕様と同様な制御効果を得られないが、理論で得られたゲインを、シミュレーション結果を参照して再度微調整することで満足な制御効果の得られることが分かる。

6. 結 言

バイモルフ型圧電素子をアクチュエータとする二本指機構の把持力/先端位置決め並列制御問題につき、始めに数学モデルを組み立て機構の基本特性を理論と実験より検証し、さらに指定の指先位置において微細把持力制御を行うためのPID制御手法を示した。得られた結果を要約すると次のようになる。

1. 本二本指機構は把持力と把持変位の位置を同時に制御できる小型把持機構として十分な特性を有し、0.01Nのオーダーの把持力制御が可能である。
2. バイモルフ型圧電素子をアクチュエータとする二本の小型フレキシブルフィンガを、先端がばねで

結合された連成系として運動方程式を導き、モード級数展開法を適用した後に系をサンプリング周期で離散化する解法を採用し、その理論解を求めた。得られたシミュレーション結果は実験結果と良好に対応し、複雑な二本指機構のモデル化が妥当性であることが確認された。これより機構の設計は計算機の支援を得て系統的に行うことができることがいえる。

3. 極配置法を用いてPIDゲインを決定することにより、ほぼ制御仕様を満足する結果を得ることができる。このように得られたPIDゲインをコンピュータ上のシミュレーション結果を参照して微調整することにより制御効果をさらに高めることができる。

文 献

- (1) 岡本嗣男, バイオテクノロジーロボット, 日本ロボット学会誌, 12巻7号, 1994, pp.960-965.
- (2) 岡本嗣男, 木谷 収, 鳥居 徹, ラン科プロトコム移植ロボットに関する研究, 農業機械学会誌, 55巻5号, 1993, pp.103-110.
- (3) 岡本嗣男, 木谷 収, 鳥居 徹, バイオテクノロジー作業の自動化に関する研究(第3報, 形状記憶合金アクチュエータを用いたソフトハンドリング・ハンドのファジィ制御), 農業機械学会誌, 53巻5号, 1991, pp.85-91.
- (4) 鳥居 徹, 苗生産におけるロボット技術の現状, 計測と制御, 33巻10号, 1994, pp.843-847.
- (5) E.Al-Gallaf, A.Allen and K.Warwick, "A Survey of Multi-Fingered Robot Hands: Issue and Grasping Achievements", *Mechatronics*, Vol.3, No.4, pp.465-491, 1993.
- (6) P.Dario and G.Buttazzo, "An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.6, No.3, pp.25-48, 1987.
- (7) 中村幸博, 谷江和雄, 前川 仁, 多指ハンドによる把持物体剛性制御 (第1報, 制御構造の提案と評価実験), 日本機械学会論文集(C編), 59巻566号, 1993, pp.3138-3145.
- (8) Z.W.Jiang, S.Chonan and J.Tani, "Tracking Control of a Miniature Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.11, No.3, pp.260-267, 1992.
- (9) 江 鐘偉, 長南征二, 圧電素子で駆動される小形フレキシブルマニプレータの先端力制御(離散時間系における力センサ出力の表し方), 日本機械学会論文集(C編), 58巻548号, 1992, pp.1120-1127.
- (10) Seiji Chonan, Zhongwei Jiang and Shinichi Sakuma, "Force Control of a Miniature Gripper Driven by Piezoceramic Bimorph Cells", *Journal of Advanced Automation Technology*, Vol.6, No.4, 247-254, 1994.