

積層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, 佐藤正行*²

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

Zhongwei JIANG, Seiji CHONAN and Masayuki SATO

This paper is a study on the development a soft handling two-fingered miniature gripper driven by a piezoceramic stack. The system is essentially a magnifying mechanism cut out of a monolith. It is composed of a piezoelectric actuator, a flexible-hinged two-stage linkage and a force sensor attached at the tip of one of the fingers. A linkage that effectively transforms longitudinal expansion/contraction of the actuator into lateral fingertip motion is designed. Furthermore, a highly efficient compact force sensor is developed for measuring a minute force at the fingertip. The mathematical model of the electromechanical system is developed and applied to the study of a PID control problem where the gripper holds the object with a time-constant force 0.036 N.

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

1. 緒 言

ロボットの研究開発の発展に伴い, ロボットハンドの高機能化, 精密化がますます要求されている。ロボットは今後様々な環境に導入され, それにともない多種多様な物体を把持する機会が増えてくる。特に将来, 生体工学や医学関連分野では柔らかく壊れやすい小物体を把持する必要性が生じてくるものと思われる。このようなバイオテクノロジーにかかわる作業の特徴としては, 微細で傷つきやすい組織や生物体を無菌状態でしかもソフトに取り扱わなければならない点である。現状ではこのような作業はほとんどが手作業で行われており, 熟練した多くの労力を必要としている。またこのような諸作業においては, 操作する人間の介在が雑菌による汚染の最大の原因といわれている。このような現状に鑑み近年種々のバイオテクノロジー用ロボットグリッパの開発が行われている⁽¹⁻²⁾。

近年, ロボットハンドに関して数多くの報告がなされている⁽³⁻⁴⁾。一般にこれらの研究ではアクチュエータとしてサーボモータが使用され, その動力をワイヤークボールねじによって関節に伝達する方法が採用されている。しかしながらこのような駆動系ではワイヤのコンプライアンスや摩擦, バックラッシュにより力の伝達系にヒステリシスやごみの発生が生じ, 高速・高精度な位置決めや微小力制御の実現が困難でありまた小型化にも限界をもたらす。Ikuta⁽⁵⁾, 岡本⁽⁶⁾らは形状記憶合金をアクチュエータとして用いたマイクログリッパを開発した。しかし形状記憶合金は環境の変化(特に温度の変化など)によって影響されやすい, 高精度が望めない, さらに応答速度が遅いなど問題を有する。

これに対し圧電素子は素子の質量に比し発生力が大い, 力の再現性がよい, 耐熱性がある等の長を有し, 機構の高速高精度と小型化を可能とする⁽⁷⁾。またロボットハンドをクリーンルーム内に使用するような場合は摩擦によるゴミの発生を生じないという条件を満たさなければならないが, 圧電素子はこの条件をも満たす駆動源のひとつとしても位置付けられる。

以上の点に鑑み, 本研究は積層型圧電素子をアクチュ

* 原稿受付 1995年4月5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。

エータとする力制御型のソフトハンドリング・グリッパを開発するものである。具体的には積層型圧電素子の微小変位を効率よく拡大し、かつ大きな把持力を発生させる把持機構を設計・試作し、その動作特性を確認すると共に、グリッパ機構の動学的モデルを組み立て、対象物を0.036Nの微小力で把持する制御問題について数値シミュレーションと実験を行い、グリッパの駆動・制御特性を検討する。

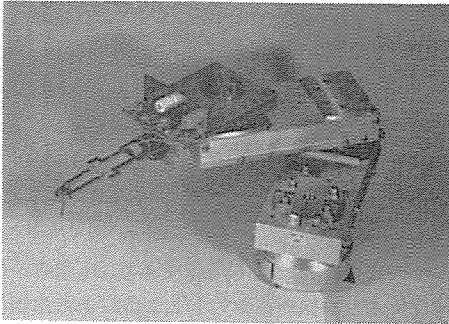


Fig. 1 Soft-handling robot.

2. 小形ソフトハンドリング・グリッパ

2.1 ソフトグリッパの機構

図1は小形ソフトハンドリング・グリッパを装着したロボットアームを示す。さらに本グリッパの概略図を図2に示す。本機構は、2本指を駆動するための積層型圧電素子、圧電素子の動きを把持動作に変換する変位拡大機構、および把持力制御のため指先に装着した接触力センサよりなっている。積層型圧電アクチュエータ(TOKIN NLA-10×10×18)は素子の特性を考慮して0~100Vの範囲の電圧で駆動する。機構の本体は図に示すように弾性ヒンジ、レバーおよび先端指からできている。積層型圧電アクチュエータの伸縮がHinge A, Bをたわませて2本のLeverを互いに逆向きに回転させ、Lever先端のHinge C, Dを介して2本のFingerを駆動する。本機構は構造的には多少複雑であるが一枚の板(本研究ではステンレス板)よりNC加工でモノリシックに削り出しているため、変形時ヒンジ部での無駄がなく効率的に変位を拡大できるという利点がある。

グリッパ指先の把持力は接触力センサにより測定される。本把持機構は微小で柔らかい対象物を把持することを目的としているため、微妙な把持力制御を実現するための微細力測定可能な高感度・高精度接触力センサが必要となる。従来のセンサは測定感度が数十

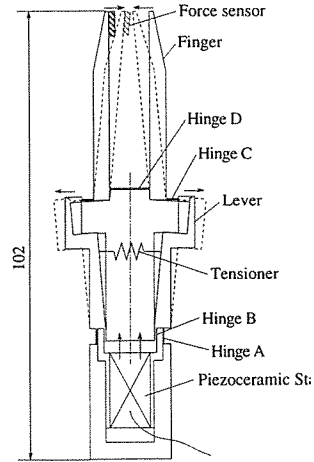


Fig. 2 Details of soft-handling gripper.

グラム重と大きく、本研究で必要とする数グラム重の小さな力の測定には不向きである。そこで本研究では、数グラム重の力の測定可能な高精度の接触力センサを試作した。試作したセンサは厚さ0.1mmの銅板と厚さ3mmのゴム間に高感度の半導体歪みゲージ(KYOWA KSP-2-E)を貼り付け、さらに薄柔軟シートで被せたものである。試作したセンサの出力特性を図3に示す。荷重は0~0.1N(0~10.2g重)の範囲で、負荷・除荷を5回繰り返した。図より負荷、除荷共に線形性があり、本センサは数グラム重の微細な力の計測が可能であることがわかる。

2.2 グリッパの静特性

試作した2本指ハンドの把持特性を調べるため始めに機構の発生力を測定する。本グリッパは機構的には対称であるため片方の指について発生力を調べる。測定に当たってはまず接触力センサをギャップアジャスターに取り付け、2本の指の間に置く。次に圧電素子に電圧をかけない状態で片方の指先とセンサ間の距離をあらかじめギャップアジャスターを回転させることで調整しておく。この状態で素子に100Vの一定電圧を印加し、その時のセンサの出力電圧を測定、センサの校正曲線より発生力を換算する。図4に指先がセンサに接触したときの先端変位と発生力の関係を示す。横軸が指先端とセンサ間の距離で、縦軸がそのときの指先の発生力を示す。指先端の変位が零、つまり圧電素子に電圧を加えない状態で指先端をセンサに接触させておき、その状態で素子に100Vの電圧を印加したときの指先発生力が最大値の0.3Nである。その後、指先端とセンサ間の距離つまり指先端変位が大きくなる

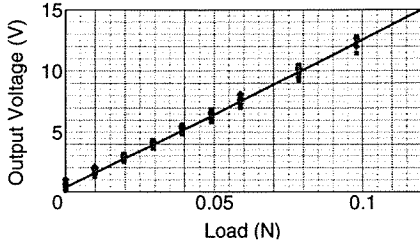


Fig. 3 Output voltage signal from force sensor.

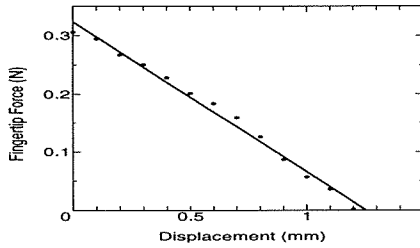


Fig. 4 Variation of fingertip force vs. displacement.

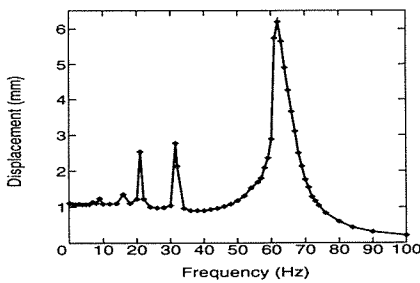


Fig. 5 Resonance curve.

につれて指先発生力はほぼ直線的に減少していくことが分かる。これは、電圧をかけない状態での指先端位置と対象物間の距離が大きくなるほどグリッパの把持力が小さくなることを意味する。

2.3 グリッパの動特性

次に2本指機構の動特性について調べて見る。機構は対称であるため同様に片方の指についての測定を行う。測定はファンクションジェネレーターを用いて100Vの正弦波電圧を圧電素子に印加し、印加電圧の周波数を変化させてグリッパの指先を振動させ、その発生変位を高精度レーザー変位計で測定した。得られた指先変位の周波数応答を図5に示す。グラフの横軸は素子への入力正弦波電圧の周波数、縦軸は指先端の変位を表す。図より、周波数が零近傍で指先端にほぼ1.2mmの変位が得られることがわかる。また周波数が21Hz, 31.5Hz, 63Hz付近に変位のピークがみられる。本グリ

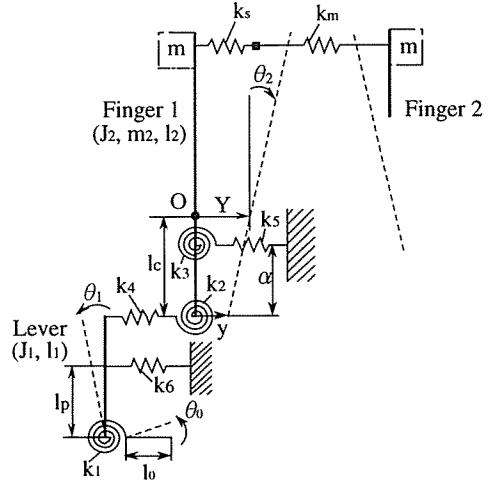


Fig. 6 Theoretical model of gripper.

ッパの一次固有振動数は63 Hzであり、圧電素子の非線形特性により共振周波数の1/2, 1/3にあたる周波数31.5Hz, 21Hzで分数調波共振が生じグリッパが大きく振動することがわかる。

3. グリッパのモデル化及び理論解析

3.1 運動方程式

図2に示したグリッパは対称であるため機構の半分を考え、そのモデル図を図6に示す。図2のHinge AとBは回転ばね k_1 で、LeverとFinger間のHinge Cは回転ばね k_2 と並進ばね k_4 で、Hinge Dは回転ばね k_3 と並進ばね k_5 でモデル化し、さらに初期張力を与えるための板ばね(Tensioner)は並進ばね k_6 でモデル化する。指先端は対象物と接触力覚センサを介して接触している。センサの剛性を並進ばね k_s で、対象物の剛さを並進ばね k_m でモデル化し、さらに合成ばねの剛性 $(k_s k_m)/(k_s + k_m)$ を k_{sm} と置く。なお指先端のセンサと対象物の質量は2本指に等分に振り分け、それぞれ指先端の集中質量として扱う。なお、FingerとLeverはいずれも剛体とみなす。

さて、圧電素子の発生変位 u が回転ばね k_1 に回転角 $\theta_0 (= u/l_0)$ 与え機構を動かすと仮定すると、この場合Fingerの運動方程式は次のように与えられる。

•Fingerの並進運動

$$\begin{aligned}
 (m_2 + m)\ddot{Y} = & -k_4(Y - l_c\theta_2 + \theta_1 l_1) \\
 & -k_5(Y - \theta_2(l_c - \alpha)) \\
 & -k_{sm} \times 2(y + l_2\theta_2). \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

●Finger の回転運動

$$\begin{aligned}
 (J_2 + m(l_2 - l_c)^2)\ddot{\theta}_2 = & \\
 -k_2\theta_2 - k_3\theta_2 + k_4(Y - l_c\theta_2 + l_1\theta_1)l_c & \\
 + k_5(Y - \theta_2(l_c - \alpha)) \times (l_c - \alpha) & \\
 -k_{sm} \times 2(y + l_2\theta_2)(l_2 - l_c). & \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

●Lever の回転運動

$$\begin{aligned}
 J_1\ddot{\theta}_1 = -k_1(\theta_1 - \theta_0) - k_4(Y - l_c\theta_2 + l_1\theta_1)l_1 & \\
 -k_6l_p^2\theta_1. & \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

ここで、

- J_1 : Lever の回転中心まわりの慣性モーメント
- J_2 : Finger の重心まわりの慣性モーメント
- l_0 : Hinge A と Hinge B の間の距離
- l_1 : Lever の長さ
- l_2 : Finger の長さ
- m : 指先端の等価集中質量
- m_2 : Finger の質量
- l_p : Lever 根元から板ばねまでの距離
- l_c : Finger の根元から重心までの距離
- α : Hinge C と Hinge D の間の距離
: (並進ばね k_4 と k_5 の距離)
- Y : Finger 重心の並進運動距離
- θ_1 : Lever の回転角
- θ_2 : Finger の回転角
- θ_0 : 圧電素子による入力角

上式において指先端の等価集中質量 m は、センサの質量 m_s と対象物の質量 m_m の平均値 $(m_s + m_m)/2$ である。また $m'_2 = (m_2 + m)$, $J'_2 = J_2 + m(l_2 - l_c)^2$ により、Finger の等価質量と等価慣性モーメントを表わす。

Finger 重心の並進移動距離 Y は Finger 根元の並進移動距離 y および Finger の回転角 θ_2 と次の関係を有する。

$$Y = y + l_c\theta_2. \dots\dots\dots (4)$$

上式を式(1), (2)および(3)に代入すると

$$\begin{aligned}
 m'_2(\ddot{y} + l_c\ddot{\theta}_2) = -(k_4 + k_5 + 2k_{sm})y - k_4l_1\theta_1 & \\
 -(k_5\alpha + 2k_{sm}l_2)\theta_2, & \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 = -k_4l_1y - (k_1 + k_4l_1^2 + k_6l_p^2)\theta_1 + k_1\theta_0, \dots (6)$$

$$\begin{aligned}
 J'_2\ddot{\theta}_2 = (k_4l_c + k_5(l_c - \alpha) - 2k_{sm}(l_2 - l_c))y + k_4l_1l_c\theta_1 & \\
 + (k_5(l_c - \alpha)\alpha - k_2 - k_3 - 2k_{sm}l_2(l_2 - l_c))\theta_2. & \dots (7)
 \end{aligned}$$

が得られる。さらに、 $\theta_0 = u/l_0$ を用いて式(5), (6)および(7)をマトリクス表示すると

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{U}u, \dots\dots\dots (8)$$

ここに

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m'_2 & 0 & m'_2l_c \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J'_2 \end{pmatrix}, \mathbf{K} = (k_{ij}),$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 \\ k_1/l_0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{X} = \begin{pmatrix} y \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix},$$

$$k_{11} = k_4 + k_5 + 2k_{sm},$$

$$k_{12} = k_4l_1,$$

$$k_{13} = k_5\alpha + 2k_{sm}l_2,$$

$$k_{21} = k_4l_1,$$

$$k_{22} = k_1 + k_4l_1^2 + k_6l_p^2,$$

$$k_{23} = 0,$$

$$k_{31} = 2k_{sm}(l_2 - l_c) - k_4l_c - k_5(l_c - \alpha),$$

$$k_{32} = -k_4l_1l_c,$$

$$k_{33} = 2k_{sm}l_2(l_2 - l_c) + k_2 + k_3 - k_5(l_c - \alpha)\alpha.$$

である。

3.2 ばね定数 ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$) の決定3.2.1 Hinge A と B の合成回転ばね定数 (k_1)

Hinge A, Hinge B を図7のように片持ちはりで近似する。ここではHinge B のはり先端に外部よりモーメント T を作用させた場合のはり先端のたわみ角とモーメント T の関係より、Hinge A と B の合成等価回転ばね定数 k_1 を算出する。図中の F および M は、Hinge A および Hinge B の先端が接続されているためにそれぞれに内力として働くせん断力とモーメントを表わす。さらに両片持ちはりの間の境界条件は次の

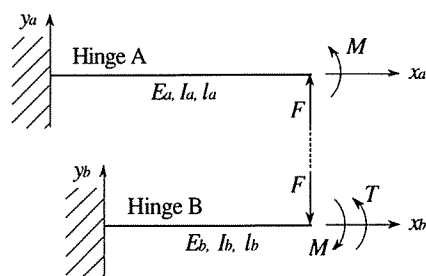


Fig. 7 Equivalent stiffness of Hinge A and Hinge B.

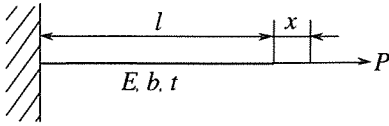


Fig. 8 Equivalent stiffnesses of Hinge C and Hinge D.

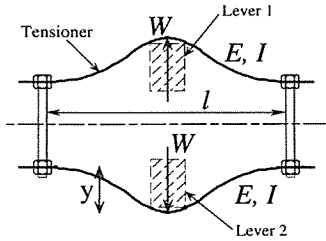


Fig. 9 Model of Tensioner.

ように与えられる。

$$\begin{cases} (y_a)_{x_a=l_a} = (y_b)_{x_b=l_b}, \dots\dots\dots (9) \\ (\theta_a)_{x_a=l_a} = (\theta_b)_{x_b=l_b}. \end{cases}$$

さて、Hinge B にモーメント T が働くと、Hinge A と Hinge B のひずみエネルギーは

$$U_a = \frac{1}{2E_a I_a} \int_0^{l_a} (F(l_a - x_a) + M)^2 dx_a, \dots\dots (10)$$

$$U_b = \frac{1}{2E_b I_b} \int_0^{l_b} (-F(l_b - x_b) - M + T)^2 dx_b. \dots\dots (11)$$

となる。式(10)および(11)よりカスチリアーノの定理を用いて Hinge A の先端変位 y_a および回転角 θ_a を求めると

$$(y_a)_{x_a=l_a} = \frac{\partial U_a}{\partial F} = \frac{1}{E_a I_a} \left(\frac{F}{3} l_a^3 + \frac{M}{2} l_a^2 \right), \dots\dots (12)$$

$$(\theta_a)_{x_a=l_a} = \frac{\partial U_a}{\partial M} = \frac{1}{E_a I_a} \left(\frac{F}{2} l_a^2 + M l_a \right). \dots\dots (13)$$

同様に Hinge B の先端変位 y_b および回転角 θ_b を求めると

$$(y_b)_{x_b=l_b} = \frac{1}{E_b I_b} \left(-\frac{F}{3} l_b^3 + \frac{(T - M)}{2} l_b^2 \right), \dots\dots (14)$$

$$(\theta_b)_{x_b=l_b} = \frac{1}{E_a I_a} \left(-\frac{F}{2} l_b^2 + (T - M) l_b \right). \dots\dots (15)$$

これらを式(9)に代入し整理すると

$$\begin{aligned} & F(E_b I_b l_a^3 + E_a I_a l_b^3) / 3 + M(E_b I_b l_a^2 + E_a I_a l_b^2) / 2 \\ & = T E_a I_a l_b^2 / 2, \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & F(E_b I_b l_a^2 + E_a I_a l_b^2) / 2 + M(E_a I_a l_b + E_b I_b l_a) \\ & = T E_a I_a l_b. \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

上式を

$$\begin{cases} F \times A + M \times B = T \times C l_b, \dots\dots\dots (18) \\ F \times B + M \times D = T \times 2C \end{cases}$$

と置き換えるとせん断力 F 、モーメント M は

$$F = \frac{T \times C(l_b \times D - 2B)}{AD - B^2}, \dots\dots\dots (19)$$

$$M = \frac{T \times C(l_b \times B - 2A)}{B^2 - AD}. \dots\dots\dots (20)$$

上式を式(13)に代入すると、 $\theta_1 (= \theta_a = \theta_b)$ は

$$\theta_1 = \frac{T C l_a (l_a l_b D - 2B(l_a + l_b) + 4A)}{2 E_a I_a (AD - B^2)}. \dots\dots (21)$$

したがって等価回転ばね定数 k_1 は

$$k_1 = \frac{2 E_a I_a (AD - B^2)}{C l_a (l_a l_b D - 2B(l_a + l_b) + 4A)}. \dots\dots (22)$$

と求まる。ここに

$$\begin{aligned} A &= (E_b I_b l_a^3 + E_a I_a l_b^3) / 3, \\ B &= (E_b I_b l_a^2 + E_a I_a l_b^2) / 2, \\ C &= E_a I_a l_b / 2, \\ D &= E_a I_a l_b + E_b I_b l_a. \end{aligned}$$

さらに、上式に Hinge A および Hinge B の物性値を代入してばね定数 k_1 が

$$k_1 = 19.65 \quad [\text{Nm}] \dots\dots\dots (23)$$

と求まる。

3.2.2 Hinge C と D のばね定数 ($k_2 \sim k_5$)

●合成等価回転ばね定数 ($k_2 + k_3$)

Hinge C と D を Hinge A と B と同様に2つの片持ちはりと考え、両ヒンジの合成回転ばね定数 k_{cd} は式(22)と同形となり、式(22)の Hinge A を Hinge C に、Hinge B を Hinge D の物性値に置き換えると

$$k_{cd} = 0.4844 \quad [\text{Nm}] \dots\dots\dots (24)$$

を得る。ここに $k_{cd} = k_2 + k_3$ であり k_{cd} は k_2 と k_3 を一つの回転ばねに置き換えたものである。

●等価並進ばね定数 (k_4, k_5)

Hinge C および Hinge D を図8のように軸方向に張力 P の作用する一様はりと考え、この場合のはりの伸び x はヒンジの並進ばね定数 k を用いて次のように表される。

$$x = P/k$$

ここでヒンジに生じる応力とひずみを σ, ϵ とし、さらにヒンジの幅、厚さ、縦弾性係数および長さをそれ

それぞれ b, t, E および l で表すと、等価並進ばね定数 k は

$$k = \frac{P}{x} = \frac{bt\sigma}{x} = \frac{btE\epsilon}{x} = \frac{btEx}{xl} = \frac{Ebt}{l}$$

と求まる。Hinge C および Hinge D の物性値をそれぞれ上式に代入し

$$k_4 = 4.620 \times 10^7 \text{ [N/m]} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$k_5 = 5.280 \times 10^7 \text{ [N/m]} \quad \dots\dots\dots (26)$$

を得る。

3.2.3 板ばね (Tensioner) のばね定数 (k_6)

板ばねを両端固定はりとして図9のように近似し、これに材料力学の解析を適用することによりはり中央に作用する力 W とたわみ y の関係が次のように与えられる。

$$y = Wl^3/192EI \quad (27)$$

これより

$$k = 192EI/l^3 \quad (28)$$

となる。上式に板ばねの物性値を代入すると等価ばね定数 k_6 は

$$k_6 = 3.117 \times 10^4 \text{ [N/m]} \quad (29)$$

と求まる。以上得られたばね定数を表1にまとめる。

Table 1 Equivalent stiffness parameters.

$k_1=19.65\text{[Nm]}$	$k_2 + k_3=0.4847\text{[Nm]}$
$k_4=4.620 \times 10^7\text{[N/m]}$	$k_5=5.280 \times 10^7\text{[N/m]}$
$k_6=3.117 \times 10^4\text{[N/m]}$	

以上の理論解析モデルの妥当性を調べるため、機構のFinger先端が自由である場合につき固有振動数を計算し、その値を実験値と比較して見る。式(8)に機構の物性値と等価ばね定数の値(表1)を代入すると、グリッパ機構の固有振動数の理論値 f は

$$f = 60.84 \text{ [Hz]} \quad (30)$$

と算出される。一方、実験において圧電素子に正弦波電圧を加え機構を振動させて得られた固有振動数は

$$f = 63.00 \text{ [Hz]} \quad (31)$$

であり、計算値と実験値はほぼ一致していることから、本グリッパ機構の解析モデルは妥当であるといえる。

さて、グリッパの運動方程式(8)を状態空間で表示すると次のよう変形される。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c u(t), \\ F_s(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (32)$$

ただし

$$\mathbf{x}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A}_c = \begin{pmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & \mathbf{O} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_c = (\mathbf{O} \quad \mathbf{M}^{-1}\mathbf{U})^T, \quad \mathbf{C}_c = (1 \quad 0 \quad l_2 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad \dots\dots\dots (33)$$

さらにデジタル制御を行うため、連続時間系の入力 $u(t)$ をサンプリング周期 T 間で一定と見なす0次ホールド近似を用いて離散化すると、式(32)の離散時間系における状態方程式は

$$\begin{cases} \mathbf{x}(i+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(i) + \mathbf{B}u(i), \\ F_s(i) = \mathbf{C}\mathbf{x}(i) \end{cases}, \quad \dots\dots\dots (34)$$

となる。ただし

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \exp[\mathbf{A}_c T], & \mathbf{C} &= \mathbf{C}_c, \\ \mathbf{B} &= \int_0^T \exp[\mathbf{A}_c] \tau d\tau \mathbf{B}_c. \end{aligned} \quad \dots\dots (35)$$

4. グリッパの把持力制御

4.1 制御方法

グリッパ先端に接触力センサを取り付け、把持力を零から一定値 $F_d = 0.036\text{N}$ に保持するよう制御を行う。制御法としてはPIDフィードバック制御法を用いる。圧電素子に加える入力としては、理論計算においては駆動変位 u

$$\begin{aligned} u(i) &= G_p(F_d - F_s(i)) \\ &\quad - G_v(F_s(i) - F_s(i-1))/T \\ &\quad + \frac{1}{2}G_I \sum_{k=0}^i (2F_d - F_s(k) - F_s(k-1)) \end{aligned} \quad (36)$$

実験では電圧 V

$$\begin{aligned} V(i) &= g_p(V_d - V_s(i)) \\ &\quad - g_v(V_s(i) - V_s(i-1))/T \\ &\quad + \frac{1}{2}g_i \sum_{k=0}^i (2V_d - V_s(k) - V_s(k-1)) \end{aligned} \quad (37)$$

を用いる。ここに、 F_d および $F_s(t)$ は離散時間系における目標力およびグリッパ先端発生力であり、 G_p, G_v および G_I 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。 T はサンプリングタイムであり、本実験では $T=3\text{ms}$ とした。また、 V_d, V_s は実験で用いた目標電圧と接触力センサの出力電圧であり、 (g_p, g_v, g_i) はコンピュータより与えるフィー

ドバックゲインである。なお、理論解析でのゲイン (G_p, G_v, G_I) と実験で与えるゲイン (g_p, g_v, g_i) との間には次の関係がある。

$$\begin{cases} g_p = 1.1 \times 10^4 G_p, \\ g_v = 3.7 \times 10^6 G_v, \dots\dots\dots (38) \\ g_i = 1.1 \times 10^4 G_I. \end{cases}$$

フィードバックゲインの決定のために、システムの閉ループ伝達関数 $H(z)$

$$H(z) = \frac{P(z)G(z)}{1 + P(z)G(z)} \dots\dots\dots (39)$$

を用いる。ここに $P(z), G(z)$ はPIDコントローラ及びグリッパ機構の伝達関数であり、式(34)および式(36)より次のように与えられる。

$$P(z) = G_p + \frac{G_v}{T}(1 - z^{-1}) + \frac{G_I}{2} \frac{(1 + z^{-1})}{(1 - z^{-1})}, \quad (40)$$

$$G(z) = C(zI - A)^{-1}B \dots\dots\dots (41)$$

ここで閉ループ伝達関数 $H(z)$ の応答に最も関係する低次モードの極に注目し、その極が希望の制御仕様より決定された設定極に最も近づくようフィードバックゲインを設定することを考える。具体的には一般の2次振動系を表す閉ループ伝達関数 $T(s)$

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (42)$$

を用い、その過渡応答を表すパラメータ (オーバーシュート O_s , 整定時間 t_s および許容誤差 δ) を希望の制御仕様を満たすように設定する。すなわち

$$O_s = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}, \dots\dots\dots (43)$$

$$t_s = -\ln \delta / \zeta\omega_n, \dots\dots\dots (44)$$

より2次振動系の極 (ζ, ω_n) を求め、この希望の極を S 平面から z 平面に変換し、さらに式(39)から求められる低次モードの極がこの希望の極に最も近づくよう反復計算を行いフィードバックゲインを決定する。

4.2 計算結果ならびに実験結果

設定した制御仕様と、その制御仕様を満たす2次振動系の極に最も近づくよう計算されたPIDゲインを表2に示す。

制御仕様は、本グリッパの把持対象物が微小で柔らかい物であることを考え、オーバーシュート O_s は1%に固定し整定時間 t_s を $t_s = 0.3(\text{sec}), 0.1(\text{sec}), 0.02(\text{sec}), 0.01(\text{sec})$ と次第に短くしていく。上記4つの場合について得られた結果をそれぞれ図10-図13に示す。各図において、図(a)は数値計算結果、(b)は実験結果であ

Table 2 Control specification.

	制御仕様	PIDゲイン
case 1	$O_s=1\%$ $t_s=0.3$	$G_p = 2.0 \times 10^{-9}$ $G_v=0.0$ $G_I = 1.734 \times 10^{-6}$
case 2	$O_s=1\%$ $t_s=0.1$	$G_p = 1.2 \times 10^{-8}$ $G_v = 1.15 \times 10^{-12}$ $G_I = 4.46 \times 10^{-6}$
case 3	$O_s=1\%$ $t_s=0.02$	$G_p = 1.384 \times 10^{-6}$ $G_v=0.0$ $G_I = 1.322 \times 10^{-5}$
case 4	$O_s=1\%$ $t_s=0.01$	$G_p = 9.36 \times 10^{-6}$ $G_v=0.0$ $G_I = 2.0748 \times 10^{-5}$

り、図中の破線は目標値、実線は先端力の応答、一点鎖線は制御入力 (数値計算では素子の変位、実験では素子への印加電圧) を示している。いずれも指先端は最終的に目標値0.036Nを発生し一定値に保持している。図10から図12までの結果をみると数値計算結果、実験結果は共に制御仕様を満たしており、本解析モデルは妥当であることがわかる。一方、図13においては数値計算結果に振動がみられるが、これは本解析モデルにゴムを母材とした接触力センサの減衰が考慮されていないことが原因と見られる。さらに整定時間を短くした仕様も試みたが、制御仕様を満たすゲインを求めることはできなかった。原因としては以下のことが考えられる。すなわちPID制御法を用いた場合立ち上がりを早くするためには大きなゲインを用いる必要があるが、あまり大きなゲインを選ぶと制御開始時に目標値とセンサ出力との偏差が大きくなるため過大な制御入力力が制御対象に加わり、系の不安定化につながるものと思われる。

5. 結言

本研究は積層形圧電素子で駆動されるソフトハンドリング・グリッパを試作し、その把持特性を調べたものである。グリッパの把持動作はPID制御を適用し、把持力を一定値に保持する問題を理論と実験で解析した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

1. 本研究で開発したグリッパは約10ミクロンの圧電素子の変位を1.2mmまで拡大することができ、またグラム重単位で把持力を制御することが可能で

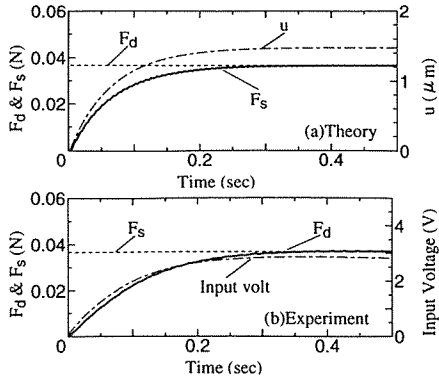


Fig. 10 Response of gripper for specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.3(\text{sec})$.

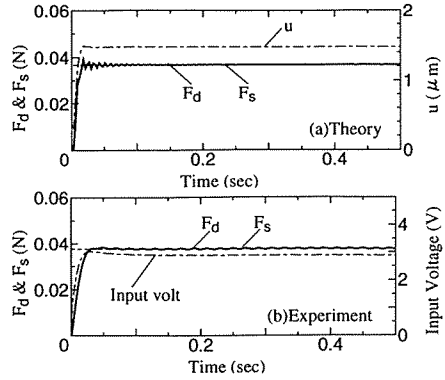


Fig. 12 Response of gripper for specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.02(\text{sec})$.

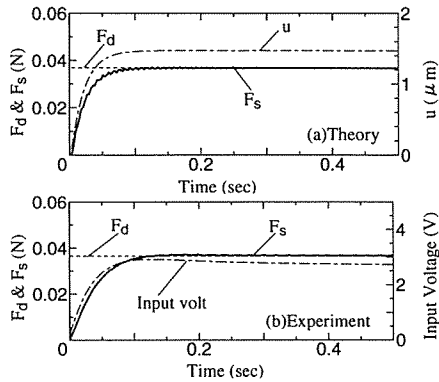


Fig. 11 Response of gripper for specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.1(\text{sec})$.

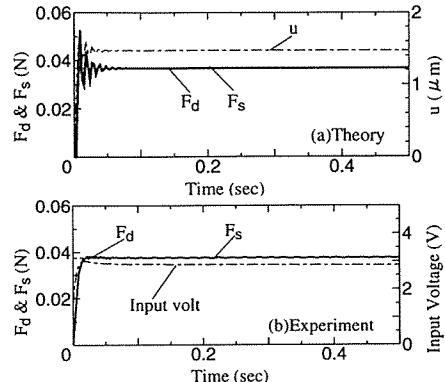


Fig. 13 Response of gripper for specifications $O_s=1\%$, $t_s=0.01(\text{sec})$.

ある。このため本装置はバイオテクノロジー用ロボットのソフトハンドリング・グリッパとして使用可能である。

2. 数値計算結果は実験結果と良好に対応しており、本装置のモデル化と解析法は妥当であることが確認された。したがって、本解析法は今後のより複雑なソフトハンドリング・グリッパの設計に適用できる。
3. PID 制御法は積層型圧電素子で駆動されるグリッパの把持力制御に有効であり、特に本把持機構においては積分ゲインが最も制御効果に影響がある。フィードバックゲインを決める際は始めに極設定法を導入してフィードバックゲインを選び、さらに数値シミュレーション結果を見ながらゲインの微調節を行うことで最適フィードバックゲインを比較的容易に得ることができる。

文 献

- (1) W.Simonton and J.Pease, Automatic plant feature identification on geranium cuttings using machine vision, *Trans. ASME*, **33-6**, 2067.
- (2) 三輪, メリクロンロボット, 計測と制御, **26-3**(1987), 219.
- (3) P.Dario and G.Buttazzo, An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception, *Int. J. Rob. Res.*, **6-3**(1987), 25.
- (4) J.K.Salisbury and J.J.Craig, Articulate Hand: Force Control and Kinematic Issues, *Int. J. Rob. Res.*, **1-1**(1982), 4.
- (5) K.Ikuta, D.C.Beard, S.Ho, and H.Mooin, Direct Stiffness and Force Control of a Shape Memory Alloy Actuator and Application to Miniature Clean Gripper, *ASME Winter Annual Meeting*, (1989), 241.
- (6) 岡本, ほか 2 名, 木谷, 鳥居, バイオテクノロジー作業の自動化に関する研究, *農業機械学会誌*, **53-5**(1991), 85.
- (7) 内野研二 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版 (1986).