

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2報, 把持動作制御用コントローラ的设计)

江 鐘 偉*¹, 長南 征二*¹, 小 関 満*²

Development of a Soft-Handling Gripper Driven by Bimorph Piezoactuators (2nd Report, Design of New Controller for Robust Grasping Performance)

Zhongwei JIANG, Seiji CHONAN and Mituru KOSEKI

This paper is a study on the hybrid force/position control of a two-fingered miniature gripper driven by piezoelectric bimorph cells. The system is composed of two flexible cantilevers and a compact force sensor attached to the tip of one finger. Control action is applied by two piezoelectric bimorph strips placed at the base of each finger. Both the classical PID control and the H_∞ control algorithm are examined for the control problem in which the gripper is commanded to grasp an object with a time-constant force 0.01 N at a prescribed fingertip position. Furthermore, a new PID controller based on the H_∞ theory is proposed and applied to the control of the gripper. It is found that the modified PID controller is simple and shows good robustness for controlling and driving the gripper.

Key Words: Mechanism, Gripper, Piezoceramic Bimorph, Force Sensor, Minute Force/Position Control, PID Controller, H_∞ Controller, Modified PID Controller

1. 結 言

生物工学の分野では組織培養や細胞融合が広く手作業で行われており, 作業者への負担は大きく効率も十分ではない。また, 注射針やガーゼなどの医療廃棄物の取り扱いも伝染病感染の予防のためロボットグリッパを用いた自動化ならびに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についてである。ソフトハンドリング・グリッパについて岡本ら^(2,3)は形状記憶合金アクチュエータを用いたプロトコム移植ロボットを開発した。また Jiang および Chonan ら^(8,9)は弾性フィンガを用いたバイモルフ型圧電素子で駆動されるフレキシブルフィンガを開発した。アクチュエータとして圧電体を導入することで形状記憶合金の反応速度が遅い, 温度制御し

にくい等の問題が解決され, 微細力制御に適する小型軽量かつクリーンなフィンガが実現可能となった。本研究の第一報で⁽¹⁰⁾, 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た二段駆動二本指機構を開発し, 二本指機構のモデル解析と把持動作の制御特性について検討を行った。

一方, 本グリッパの指部分に外乱などの影響で対象物に過大な力をかけないようにフレキシブルはりを用いている。そのため, 対象物の軟らかさや質量などの変動によってフレキシブルはりに振動をもたらし, 微細把持力の制御を妨げることがある。従って, 対象物の変動に対してロバスト性の強いコントローラの構築が要求されている。この点に鑑み, 本報はソフトハンドリング・グリッパの微細把持力ならびに先端変位位置決め制御について, 始めに古典PIDコントローラと H_∞ コントローラを適用した場合の駆動制御性を比較検討し, さらにロバスト性のある H_∞ コントローラの特性をPIDコントローラに組み込んだ改良PIDコントローラを提案し, その制御性を理論と実験により検討, 確

* 原稿受付 1996年5月20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。

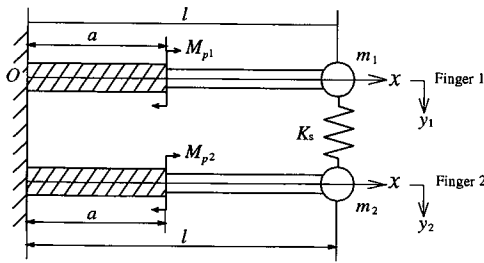


Fig.1 Geometry of problem and coordinates.

認するものである。

2. ソフトハンドリング二本指機構

本研究で試作した二本指のソフトハンドリング・グリッパを図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二本の銅製フレキシブルはりよりなる把持部, およびステッピングモータと精密開閉ボールネジよりなる開閉機構部からなっている。バイモルフ型圧電素子は先端の発生変位がおよそ300μmと小さいため, 多少大きなものを掴む機構のアクチュエータとしては変位が十分でない。そこで本機構では始めにステッピングモータを駆動し, ボールネジを介して両指が対象物に接触するまで指を移動し, その後圧電素子を駆動し指先の微小把持力制御を実現している。本機構の開閉量はステッピングモータへの入力1パルスあたり5μmである。圧電素子の速応性と指先に付けられた触覚センサの柔軟性により対象物との衝突で生じる振動はほぼ抑制できるため, 本報では主に両指が対象物と接触を始めた状態からの把持動作と微小力制御について理論解析と実験を行った。

3. モデル化及び理論解析

二本指機構のモデルを図1に示す。二本指の指先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 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 として表わしている。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, それらの先端発生力と位置の制御問題について解析を行う。Finger $i(i=1, 2)$ の単位長さあたりの質量および曲げ剛性を $\rho A_i(x), EI_i(x)$ とおくと

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

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

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

上式において ρ_b^i, A_b^i, E_b^i および I_b^i は Finger i の弾性はり部, ρ_p^i, A_p^i, E_p^i および I_p^i は圧電素子部の密度, 断面積, 縦弾性係数および断面二次モーメントを表わす。Finger i の内部減衰係数を c_i とすると Finger $i(i = 1, 2)$ の運動方程式は

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

ここに y_1 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 Finger $i(i = 1, 2)$ に作用する力であり

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

と与えられる。以下では二本指が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 $\rho A_1(x) = \rho A_2(x) \equiv \rho A(x), EI_1(x) = EI_2(x) \equiv EI(x), m_1 = m_2 = m, c_1 \equiv c_2 \equiv c$ と置く。この場合運動方程式は

$$[\rho A(x) + m \delta(x-l)] \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI(x) (1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2}] + (-1)^{i+1} K_s [y_1(x, t) - y_2(x, t)] \delta(x-l) = M_{pi} [\delta'(x-0) - \delta'(x-a)], \dots \dots (4)$$

となる。以下, 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, 固定端側から $j = I, II$ と番号を付けて区別することとする。この場合, 式(4)の解を

$$y_i(x, t) = \sum_{n=1}^N W_{sn}^j(x) f_{sn}(t) + (-1)^{i+1} \sum_{n=1}^N W_{an}^j(x) f_{an}(t) \dots \dots (5)$$

$i = 1, 2, j = I, II.$

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に振動する場合のモード関数であり, f_{sn} と f_{an} はそれらに対応する時間関数である。また, N は近似項数を表わす。さて, モード関数 $W_{sn}(x)$ および $W_{an}(x)$ (以下モードを表わす添え字 n

を省略) は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。

$$\begin{aligned} W_s^j(x) &= A_s^j S(\xi_s^j x) + B_s^j T(\xi_s^j x) + C_s^j U(\xi_s^j x) \\ &+ D_s^j V(\xi_s^j x) + \frac{\alpha^4}{(\xi_s^j)^3} W_s^j(l) V[\xi_s^j(x-l)] H(x-l), \\ W_a^j(x) &= A_a^j S(\xi_a^j x) + B_a^j T(\xi_a^j x) + C_a^j U(\xi_a^j x) \\ &+ D_a^j V(\xi_a^j x) + \frac{\beta^4}{(\xi_a^j)^3} W_a^j(l) V[\xi_a^j(x-l)] H(x-l), \\ &j = I, II, \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} (\xi_s^j)^4 &= -\frac{(\rho A)^j p_s^2}{(EI)^j (1 + cp_s)}, \quad \alpha^4 = -\frac{mp_s^2}{E_b I_b (1 + cp_s)}, \\ (\xi_a^j)^4 &= -\frac{(\rho A)^j p_a^2}{(EI)^j (1 + cp_a)}, \quad \beta^4 = -\frac{mp_a^2 + 2K_s}{E_b I_b (1 + cp_a)}, \\ (\rho A)^I &= \rho_p A_p, \quad (\rho A)^{II} = \rho_b A_b, \\ (EI)^I &= E_p I_p, \quad (EI)^{II} = E_b I_b, \\ S(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)], \\ T(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)], \\ U(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)], \\ V(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)] \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

であり、 $H(\cdot)$ 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先端および各要素間の境界条件より決定される。

式(5)を式(4)に代入し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。

$$M\dot{F}(t) + \Gamma\dot{F}(t) + KF(t) = QM_p(t) \dots \dots (8)$$

ただし

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} M_s & O \\ O & M_a \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_s & O \\ O & K_a \end{bmatrix}, \\ \Gamma &= \begin{bmatrix} \Gamma_s & O \\ O & \Gamma_a \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_{s1} & Q_{s2} \\ Q_{a1} & Q_{a2} \end{bmatrix}, \quad \dots (9) \\ F &= [F_s^T \quad F_a^T]^T. \end{aligned}$$

ここに $F_s = [f_{s1} \ f_{s2} \dots f_{sN}]$, $F_a = [f_{a1} \ f_{a2} \dots f_{aN}]$, $M_p = [M_{p1} \ M_{p2}]^T$ である。

以下 Finger1 および 2 を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 間で一定と見なす 0 次ホールド近似を用いて解析することとする。

4. コントローラ的设计

4.1 PID コントローラ

始めに、二本指機構の把持力/先端変位制御問題に PID 制御則を採用し、Finger1 および 2 の圧電素子に加える制御モーメントを決定する。駆動・制御方法としては、Finger1 を把持力フィードバック信号で Finger2 は指先変位信号のみで駆動する方法、あるいは Finger1 および 2 ともに把持力と先端変位信号を同時にフィードバック信号として用い制御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。そこで制御系の簡略化を計るため以下、前者の方法を採用することとする。すなわち、Finger1 は指先に取り付けられている力センサの出力信号を用い、Finger2 については先端に置かれた変位センサ出力をフィードバック信号として用い駆動する。この場合 Finger1 および 2 を駆動する制御曲げモーメントはそれぞれ

$$\begin{aligned} M_{p1}(k) &= G_{p1}[F_d - F_s(k)] \\ &- G_{v1}[F_s(k) - F_s(k-1)]/T \\ &+ \frac{1}{2} G_{I1} \sum_{i=0}^k [2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \cdot (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{p2}(k) &= G_{p2}[y_d - y_{2L}(k)] \\ &- G_{v2}[y_{2L}(k) - y_{2L}(k-1)]/T \\ &+ \frac{1}{2} G_{I2} \sum_{i=0}^k [2y_d - y_{2L}(i) - y_{2L}(i-1)] \quad (11) \end{aligned}$$

と与えられる。ここに、 F_d, F_s は把持力の目標値および力センサの出力、 y_d, y_{2L} は Finger2 の先端変位の目標値および変位センサの出力、さらに G_{pi}, G_{vi} および G_{Ii} ($i = 1, 2$) 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。これらのゲインの値は、閉ループ系の主要極が制御仕様で規定された極の位置に最も近づくよう反復計算を行う極配置法によって決定する⁽¹⁰⁾。

4.2 H_∞ コントローラ

把持対象物が生物体などではその質量が個体によって異なる。また力センサの測定レンジや分解能によってはセンサを取り替える必要も生じ、この場合はセンサの質量の変動もある。機構の制御では、このような対象物の個体差やセンサ質量の変動に対応できるロバスト性を持つ制御系の構築が望まれる。そこで本機構の制御に H_∞ 制御を適用し、先端質量の変動に対してロバスト性を有するコントローラ的设计を以下に考え

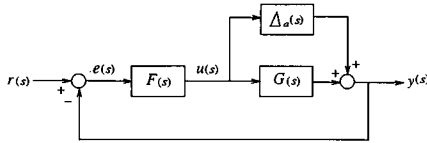


Fig.2 Feedback loop containing plant with additive uncertainty.

ることとする。図2のような閉ループ系に加法的誤差 $\Delta_a(s)$ が存在する場合を考える。スモールゲイン定理を適用すると図2の閉ループ系が安定となる条件は

$$\|\Delta_a(s)R(s)\|_\infty < 1, \dots\dots\dots (12)$$

$$R(s) = F(s)[I + G(s)F(s)]^{-1}.$$

式(12)を評価関数としてコントローラ $F(s)$ を設計すれば誤差 $\Delta_a(s)$ が存在しても閉ループ系の安定は常に保たれることになる。さて、制御対象の規範モデルを $G(s)$ 、質量等のパラメータ変動を含むモデルを $G_m(s)$ とすると加法的誤差 $\Delta_a(s)$ は

$$\Delta_a(s) = G(s) - G_m(s) \dots\dots\dots (13)$$

と表される。 $\Delta_a(s)$ はノルムが1であるユニタリ行列 U, V を用いて

$$\Delta_a(j\omega) = U \begin{bmatrix} \sigma_{a1}(j\omega) & O \\ O & \sigma_{a2}(j\omega) \end{bmatrix} V^H \dots (14)$$

のように対角行列に分解できる。ここに $\sigma_{ai}(j\omega), i = 1, 2$ は Δ_a の特異値である。次に対角重み関数行列

$$W_2(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{21}(j\omega) & O \\ O & W_{22}(j\omega) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

を導入し各対角要素を

$$|W_{21}(j\omega)| > \sigma_{a1}(j\omega), \quad |W_{22}(j\omega)| > \sigma_{a2}(j\omega) \quad (16)$$

と選ぶと、重み関数行列 $W_2(s)$ は

$$\bar{\sigma}\{\Delta_a(j\omega)\} < \bar{\sigma}\{W_2(j\omega)\} \quad (-\infty < \omega < \infty) \quad (17)$$

を満たす。図3に先端質量に2.5倍の変動を見込んだ場合の特異値 $\sigma_{ai}(j\omega)$ と $W_{2i}(j\omega), i = 1, 2$ の変化を示す。図より式(16)が満たされていることが分かる。従って、上記の重み関数行列 $W_2(s)$ を用い

$$\|W_2(s)R(s)\|_\infty < 1 \dots\dots\dots (18)$$

を満たすようコントローラ $F(s)$ を設計すれば、式(13)の誤差 $\Delta_a(s)$ に対してロバスト安定なフィードバックシステムが設計される。

一方、目標値 $r(s)$ から偏差 $e(s)$ までの閉ループ伝

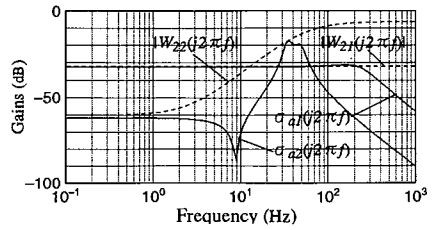


Fig.3 Principal gains of W_2 and σ_a .

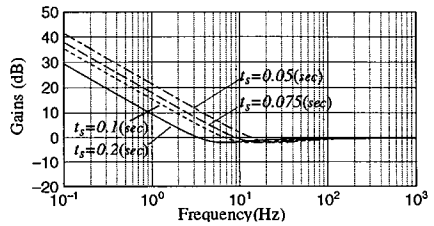


Fig.4 Principal gains of W_1 with specifications $O_s = 1\%, \epsilon = \pm 5\%$ and $t_s(\text{sec}) = 0.2, 0.1, 0.075, 0.05$.

達関数行列 $S(s)$ を求める

$$e(s) = S(s)r(s), \dots\dots\dots (19)$$

$$S(s) = [I + G(s)F(s)]^{-1} \dots\dots\dots (20)$$

となる。感度関数行列 $S(s)$ の最大特異値をできるだけ小さくすることが目標値への追従性を良くする条件となる。そこで、 $S(s)$ の最大特異値を小さくしたい周波数帯において最大特異値が大ききな値を持つ重み関数行列 $W_1(s)$ を導入し

$$\|W_1(s)S(s)\|_\infty < 1 \dots\dots\dots (21)$$

となるようコントローラを設計する。

感度関数行列 $S(s)$ に対する重み関数 $W_1(s)$ を決定するため以下のような手法を用いる。いま、Finger1 と 2 の応答が連成しないと仮定すると、それらの目標値 $r'(s)$ から出力 $y'(s)$ までの閉ループ伝達関数行列 $T'(s)$ は次のように与えられる。

$$y'(s) = T'(s)r'(s), \dots\dots\dots (22)$$

$$r'(s) = [F'_d(s) \quad y'_{2d}(s)]^T,$$

$$y'(s) = [F'_s(s) \quad y'_{2L}(s)]^T,$$

$$T'(s) = G'(s)F'(s)[I + G'(s)F'(s)]^{-1}$$

$$= \frac{1}{p'_t(s)} \begin{bmatrix} t'_{11}(s) & O \\ O & t'_{22}(s) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

上式において出力 $F'_s(s)$ と $y'_{2L}(s)$ は 2 次振動系の応答と仮定すると

$$F'_s(s)/F'_d(s) = t'_{11}/p'_t(s)$$

$$= \frac{\omega_{n1}^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}, \dots (24)$$

$$y'_{2L}(s)/y'_{2d}(s) = t'_{22}/p'_t(s) = \frac{\omega_{n2}^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2} \dots (25)$$

ここに $\omega_{n1}, \omega_{n2}, \zeta_1, \zeta_2$ はステップ入力に対してオーバーシュート O_s , 整定時間 t_s (sec) および許容誤差 ϵ なる設計仕様を満たすパラメータである。この場合系の感度関数行列 $S'(s)$ は

$$S'(s) = I - T'(Ss) = \begin{bmatrix} S'_{11} & O \\ O & S'_{22} \end{bmatrix} \dots (26)$$

$$S'_{ii}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_i\omega_{ni}s}{s^2 + 2\zeta_i\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2}, i = 1, 2. \dots (27)$$

となる。 $S'(s)$ を用いて重み関数行列 $W_1(s)$ を

$$W_1(s) = S'(s)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S'_{11}} & O \\ O & \frac{1}{S'_{22}} \end{bmatrix} \dots (28)$$

と設定する。一般的には $W_1(s)$ の対角要素はそれぞれ違うものに設定しても良いが、本設計では簡単のためさらに

$$S'_{11}(s) = S'_{22}(s) \\ W_1(s) = \frac{1}{S'_{11}} I \dots (29)$$

と設定する。これは Finger1 の先端力制御と Finger2 の先端変位制御に同じ制御仕様を設定することを意味している。従って、コントローラ $F(s)$ が

$$\|S(s)\|_\infty < \frac{1}{\|W_1(s)\|_\infty} \dots (30)$$

を満たすよう設計されれば、希望する制御仕様 $S'(s)$ を満たす応答が得られることとなる。図4にオーバーシュート $O_s = 1\%$, 許容誤差 $\epsilon = \pm 5\%$, 整定時間 t_s (sec) = 0.2, 0.1, 0.075, 0.05 に対する重み関数 $W_1(s)$ の周波数応答を示す。

さて、式(18)と(21)をまとめた混合感度評価関数が次のような条件

$$J = \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \dots (31)$$

を満たすと式(18)と式(21)はともに満たされ、閉ループ系は予想された系のパラメータ変動に対してロバスト安定であり、かつ指定した制御仕様を満たすような H_∞ コントローラ $F(s)$ を得ることができる。MATLAB の援用で求められたコントローラ $F(s)$ のゲイン周波数特性を図5に示す。

4.3 H_∞ を適用したPIDコントローラ

一般に、PID コントローラは簡単で速応性に優れ、

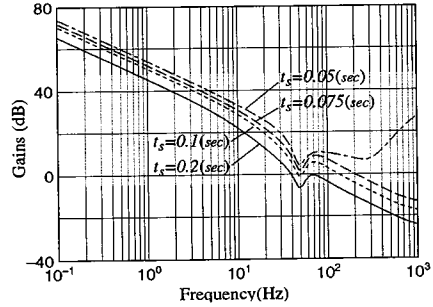


Fig.5 Principal gains of H_∞ controller with respect to the specifications $O_s = 1\%$, $\epsilon = \pm 5\%$ and t_s (sec)=0.2, 0.1, 0.075, 0.05..

H_∞ コントローラはロバスト性に強いがコントローラ自身が複雑である。以下、ロバスト性をもつPIDコントローラ的设计について考える。

まず、前節で設計した H_∞ コントローラ $F(s)$ を次のように書き直すと

$$F(s) = \begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix} \dots (32)$$

制御力は

$$M_p(s) = F(s)e(s), \dots (33)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{p1}(s) \\ M_{p2}(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_d(s) - F_s(s) \\ y_{2d}(s) - y_{2L}(s) \end{Bmatrix}$$

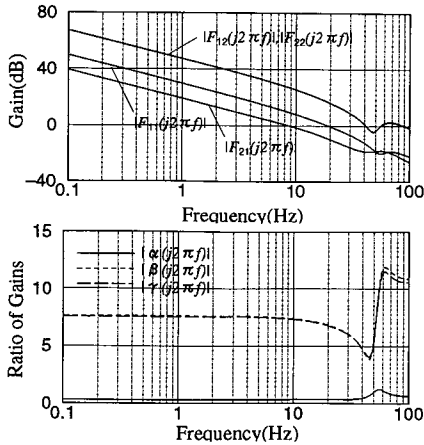
となり、Finger1 および 2 ともに把持力制御と先端変位制御を同時に行うよう駆動されていることが分かる。一方、4.1節で述べたPID制御則(10),(11)では片方の指は先端力情報、他方の指は指先の変位情報のみで制御されるよう設計されている。PID制御系において Finger1,2 を H_∞ 制御系と同様連成駆動させようとすると12個のPIDゲインを調整する必要があり大変な作業となる。そこで H_∞ コントローラのゲイン特性を参照とし、把持力と変位制御に対して Finger1, 2 のゲイン比を換算することを考え

$$\alpha(s) = F_{21}(s)/F_{11}(s), \beta(s) = F_{12}(s)/F_{11}(s), \\ \gamma(s) = F_{22}(s)/F_{11}(s) \dots (34)$$

と置くと、

$$M_{p1} = F_{11} \{ [F_d(s) - F_s(s)] + \beta(s)[y_{2d}(s) - y_{2L}(s)] \} \dots (35)$$

$$M_{p2} = F_{11} \{ \alpha(s)[F_d(s) - F_s(s)] + \gamma(s)[y_{2d}(s) - y_{2L}(s)] \} \dots (36)$$


 Fig.6 H_∞ controller

で表わされる。

さて、先端質量が2.5倍に変動した場合の前節で求められた H_∞ コントローラゲイン $F_{ij}(s)$, ならびに $|\alpha(s)|$, $|\beta(s)|$ および $|\gamma(s)|$ の周波数特性を図6に示す。図よりで低周波数領域ではゲイン比 $|\alpha(s)|$, $|\beta(s)|$ および $|\gamma(s)|$ は全て一定値となっており、一方周波数49Hz付近 (加法的誤差の最大点, 図5参照) では $|\beta(s)|$ および $|\gamma(s)|$ が極小値をとり, $|\alpha(s)|$ は1に近づいている。これらの領域におけるゲイン比の値が先端質量の変動に対する H_∞ コントローラのロバスト性と関連しているものと考えられる。

以下, 上記2つの特徴的な部分を取りあげ, $|\alpha(s)|$, $|\beta(s)|$ および $|\gamma(s)|$ が平坦な部分でのそれらの値を Case1: $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ および $f = 49\text{Hz}$ での値を Case2: $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ とおく。この2ケースにおけるゲイン比を用いてPIDコントローラを以下のように組立てる。

$$\begin{aligned}
 M_{p1}(k) = & G_p[F_d - F_s(k)] \\
 & - G_v[F_s(k) - F_s(k-1)]/T \\
 & + \frac{1}{2}G_I \sum_{i=0}^k [2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \\
 & + \beta_m G_p [y_{2d} - y_{2L}(k)] \\
 & - \beta_m G_v [y_{2L}(k) - y_{2L}(k-1)]/T \\
 & + \frac{1}{2}\beta_m G_I \sum_{i=0}^k [2y_{2d} - y_{2L}(i) - y_{2L}(i-1)], \quad (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{p2}(k) = & \alpha_m G_p[F_d - F_s(k)] \\
 & - \alpha_m G_v[F_s(k) - F_s(k-1)]/T \\
 & + \frac{1}{2}\alpha_m G_I \sum_{i=0}^k [2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \\
 & + \gamma_m G_p [y_{2d} - y_{2L}(k)]
 \end{aligned}$$

 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	

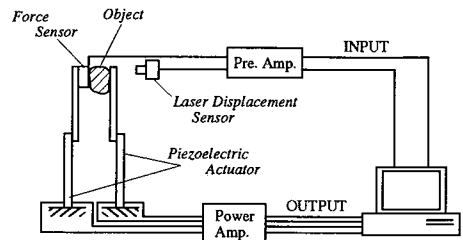


Fig.7 Experimental setup.

$$\begin{aligned}
 & -\gamma_m G_v [y_{2L}(k) - y_{2L}(k-1)]/T \\
 & + \frac{1}{2}\gamma_m G_I \sum_{i=0}^k [2y_{2d} - y_{2L}(i) - y_{2L}(i-1)]. \quad (38)
 \end{aligned}$$

上式の $m = 1, 2$ がそれぞれ Case1, Case2に対応する。これにより調整すべきPIDゲイン数は (G_p, G_v, G_I) の3個となり, 数回の数値計算の繰り返しで制御仕様を満たすPIDゲインを容易に決定することができる。

5. 制御効果および考察

実験で使用した二本指機構の物性値を表1に示す。また実験装置の概略図を図7に示す。先端把持力は Finger1 の先端に取り付けられた接触力センサ (自作したもので, 分解能は約0.001N)により測定され, Finger2 の先端位置はレーザー変位計 (KEYENCE LD2500; 分解能 $0.5\mu\text{m}$)により測定される。

以下, 前節で設計されたPIDコントローラ, H_∞ コントローラおよび改良PIDコントローラを二本指グリッパの駆動制御に適用した場合の結果を示し, それらの適応性について比較検討を行う。

始めにPIDコントローラをグリッパに適用した場合の結果を図8および図9に示す。図は制御仕様をオーバーシュート1%, 整定時間0.1(sec), 許容誤差 $\epsilon = \pm 0.5\%$ と設定した場合のPID制御の結果であり, 図9は図8の

系に対し設計されたコントローラを先端質量が2.5倍に増加された系に適用した場合の結果である。また、図中の破線は数値計算、実線は実験結果を示す。 F_d は把持力の目標値、 F_s は実把持力、 y_{2L} はFinger2の先端変位を示す。図8より、数値計算と実験は良好に対応しており、立ち上がりが速くすみやかに目標値に収束していることわかる。しかしながら、同一のPIDコントローラを先端質量が2.5倍に変動した系に適用した場合、図9に示すように把持力・先端変位ともに安定した制御結果の得られないことがわかる。

これに対して H_∞ コントローラを適用した結果を図10および11に示す。PIDコントローラと比べて H_∞ コントローラを適用した場合、制御性能の劣化はほとんど見られない。特に先端質量の変動に対しシステムは安定に制御されていることがわかる。

最後に、 H_∞ により改良されたPIDコントローラ、式(37)および(38)を用いて、ステップ入力に対してオーバーシュート $O_s=1\%$ 、整定時間 $t_s=0.1(\text{sec})$ を満たすようゲイン(G_p, G_v, G_I)を決定した場合の結果を図12-15に示す。図12-13は $G_p=0.3, G_v=0.1, G_I=0.4, \alpha_1=0.296, \beta_1=7.613, \gamma_1=7.5568$ 、図14-15は $G_p=0.2, G_v=0.05, G_I=0.3, \alpha_2=0.8244, \beta_2=4.1051, \gamma_2=4.2790$ に対する結果である。また、図12と14は先端質量が初期設定のもの、図13と15は先端質量が2.5倍に増加し

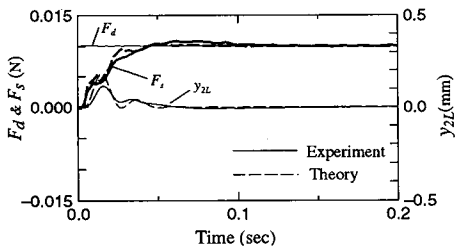


Fig.8 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with PID controller; $O_s=1\%$, $t_s=0.1(\text{sec})$; $G_{p1}=2.0, G_{v1}=0.09, G_{I1}=0.37, G_{p2}=5.0, G_{v2}=0.01, G_{I2}=6.0$.

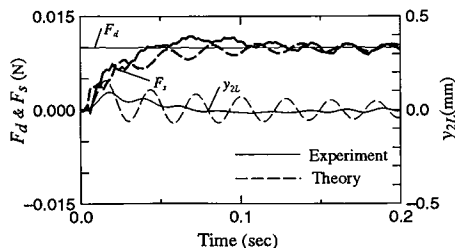


Fig.9 Same PID controller of Fig.8 used when tip mass increased by 2.5 times.

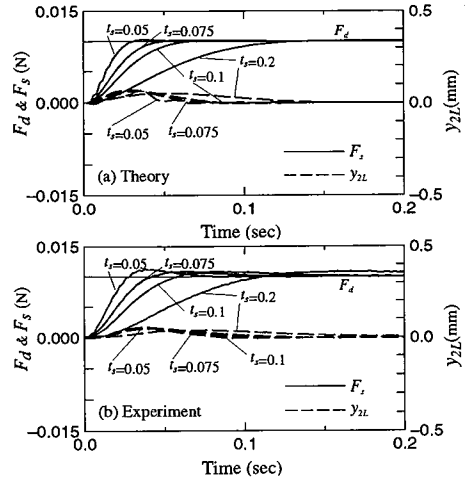


Fig.10 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with H_∞ controller; $O_s=1\%$, $t_s=0.1(\text{sec})$.

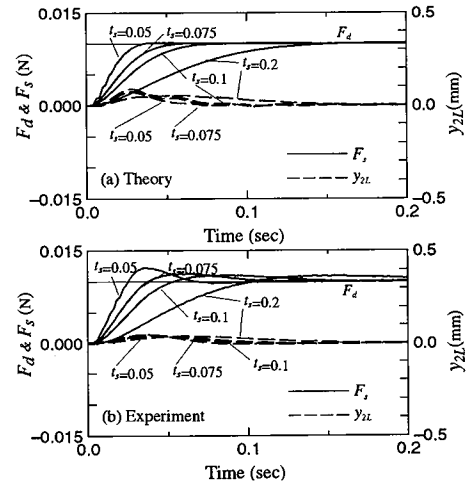


Fig.11 Same H_∞ controller Fig.10 used when tip mass increased by 2.5 times.

た場合の結果である。図より数値計算と実験結果は良く一致しており、また把持力に関しては H_∞ 制御と同程度の制御性能が実現できていることが分かる。先端変位に関しては初期位置からの変位が零に近く、 H_∞ 制御よりも制御性能が改善されていることが分かる。

また、図12, 13に示す制御ゲインパラメータの平坦値($\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$)を用いた場合、先端変位に関して数値計算では1次の同位相モードが現れ、特に図13の先端質量が2.5倍に増加した場合は把持力を一定に保ちながらフィンガ先端が揺動していることがわかる。これは制御対象の設計モデルと実際のモデルの偏差に起因するものと思われる。これに対して制御ゲインパラメー

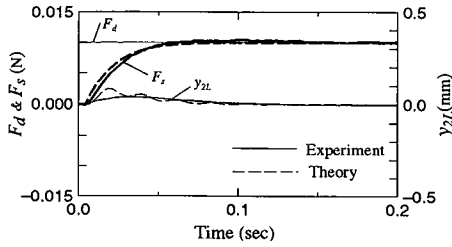


Fig.12 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with modified PID controller for case $\alpha_1=0.29$, $\beta_1=7.61$, $\gamma_1=7.55$; $O_s=1\%$, $t_s=0.1(\text{sec})$, $G_p=0.3$, $G_v=0.1$, $G_I=0.4$.

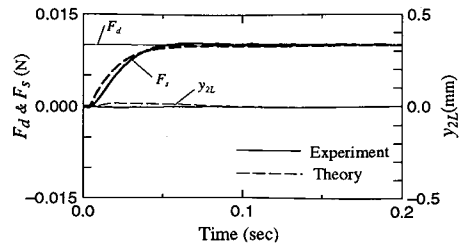


Fig.14 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with modified PID controller for case $\alpha_2=0.82$, $\beta_2=4.10$, $\gamma_2=4.27$; $O_s=1\%$, $t_s=0.1(\text{sec})$, $G_p=0.2$, $G_v=0.05$, $G_I=0.3$.

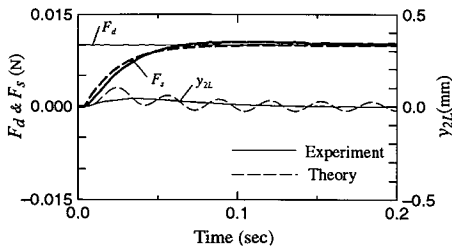


Fig.13 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with modified PID controller when tip mass of Fig.12 increased by 2.5 times.

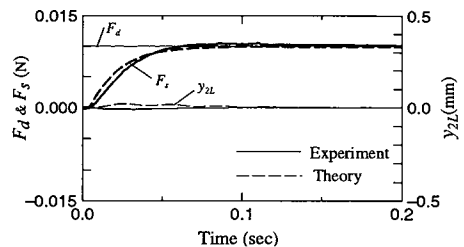


Fig.15 Fingertip force F_s and displacement y_{2L} with modified PID controller when tip mass of Fig.14 increased by 2.5 times.

タの極大・極小値(α_2 , β_2 , γ_2)を用いた場合は数値計算と実験結果が良好に対応しており、グリッパの応答にロバスト性が見られることが分かる。

以上より、本制御問題のように複数のアクチュエータで複数の制御量を制御する場合は上記手法を用いてPIDゲイン数を減らしコントローラを設計することにより、 H_∞ コントローラの持つロバスト性と優れた制御性を持つPIDコントローラを得ることができる。

6. 結 言

1. 提案した二本指機構は把持力と先端変位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のオーダーの把持動作が可能である。古典PIDコントローラは簡単であるが先端質量の変動に対するロバスト性が欠けている。 H_∞ コントローラは把持対象物の変動を予測し重み関数を適切に決定することにより制御性を損なわず把持対象物の変動に十分対応できる制御を行うことができる。
2. H_∞ コントローラの周波数特性を導入した改良PIDコントローラを提案した。本方法よりコントローラのゲインが容易に決定でき、 H_∞ コントローラの持つロバスト性と優れた制御性を持つPIDコント

ローラを得ることができる。

本研究は平成5～7年度文部省科学研究費補助金(国際共同研究)の助成を受けて行ったものである。

文 献

- (1) 岡本嗣男, 日本ロボット学会誌, 12-7(1994), 960-965.
- (2) 岡本嗣男, 木谷 収, 鳥居 徹, 農業機械学会誌, 55-5(1993), 103-110.
- (3) 岡本嗣男, 木谷 収, 鳥居 徹, 農業機械学会誌, 53-5(1991), 85-91.
- (4) 鳥居 徹, 計測と制御, 33-10(1994), 843-847.
- (5) E.Al-Gallaf, A.Allen and K.Warwick, Mechatronics, 3-4(1993), 465-491.
- (6) P.Dario and G.Buttazzo, Int. J. of Rob. Res., 6-3(1987), 25-48.
- (7) 中村幸博, 谷江和雄, 前川 仁, 機論, 59-566(1993), 3138-3145.
- (8) Z.W.Jiang, S.Chonan and J.Tani, Int. J. Rob. Res., 11-3(1992), 260-267.
- (9) Seiji Chonan, Zhongwei Jiang and Shinichi Sakuma, J. of Advanced Automation Technology, 6-4(1994), 247-254.
- (10) 江 鐘偉, 長南征二, 小関 満, 機論, 62-597(1996), 1773-1780.