

対象ダイナミクスを考慮した 1 自由度マニピュレータの力制御

成澤 哲也*

Study on Force Control of SDOF Manipulators Considering Object Dynamics

Tetsuya NARISAWA

Since the control theory has been developed for a decade, it is useful for dynamic design of continuous system having infinite freedom to adopt the control design. The author has been studied the controllability of mechanical structures involving uncertainty system parameters. In particular, influence of stiffness and damping parameters of the robot grip for the controllability of manipulator has been studied using perturbation method with examining the experimental study based on PID control rule. This paper shows robust study for the SDOF manipulator with optimal servo control theory. This study proves the robust stability of manipulator having system parameters and force disturbance using the force control theory.

Key Word: SDOF Manipulator, Force Control, Object Dynamics, Robust Servo, Observer

1. はじめに

近年の制御理論の発展により、構造系設計と制御系設計を併せた最適設計が可能となり、機械構造のような無限自由度をもつ連続系の動的設計を行う場合に大変有効となっている¹⁾。筆者はこれまで、システムに不確実性のある系の制御性について検討してきた。特に、グリップの把持対象の剛性や減衰の変動がマニピュレータの制御性に与える影響について摂動法を用いて推定し^{2)~4)}、さらにPID制御則を用いて実験的に検討した⁵⁾。本報では最適サーボ理論を用いて、1自由度マニピュレータの対象のダイナミクスを考慮した力制御系を構成し、定値外乱による定常偏差や系のパラメータ変動に対するロバスト性について示す。

2. 最適サーボ理論を用いた力制御系

Fig.1 のような 1 自由度マニピュレータ-対象物

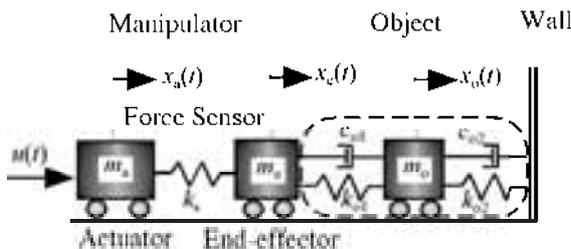


Fig. 1 Force control of SDOF manipulator considering object dynamics

系を考える^{6,7)}。系は直線上を動くマニピュレータである。簡単化のためマニピュレータはモータロータやボールねじの回転-並進イナーシャを持つ剛体とし、弾性と減衰は無視する。エンドエフェクタは質量のみとし、対象物および対象物の壁との弾性接触を考慮したモデルとする。

アクチュエータ、エンドエフェクタ、対象物それぞれの一般化変位を $x_a(t)$, $x_e(t)$, $x_o(t)$ とし、状態量を $\mathbf{x}(t)$, 制御力と力センサ出力をそれぞれ $u(t)$, $f_s(t)$ とおく。また、システムへの定値持続外乱力を $d(t)$ で与える。すると状態方程式と出力方程式は、

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{d}d(t) \\ f_s(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t), f_o(t) = \mathbf{c}_o\mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x} &= \{ \dot{x}_a, \dot{x}_e, \dot{x}_o, x_a, x_e, x_o \} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [a_{ij}], (i, j = 1 \dots 6) \\ a_{14} = a_{25} = a_{36} = 1, \\ a_{41} = -k_a / m_a, a_{42} = -k_s / m_a, \\ a_{51} = k_s / m_e, a_{52} = -(k_s + k_{o1}) / m_e, \\ a_{53} = k_{o1} / m_e, a_{55} = -a_{56} = -c_{o1} / m_e, \\ a_{62} = k_{o1} / m_o, a_{63} = -(k_{o1} + k_{o2}) / m_o, \\ a_{65} = c_{o1} / m_o, a_{66} = -(c_{o1} + c_{o2}) / m_o, \\ \mathbf{b} = \{ 0 \ 0 \ 0 \ 1/m_a \ 0 \ 0 \}, \\ \mathbf{c} = \{ k_s \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \}, \\ \mathbf{c}_o = \{ 0 \ k_{o1} \ -k_{o1} \ 0 \ c_{o1} \ -c_{o1} \} \end{cases} \quad (1)$$

m_a : マニピュレータ質量 [kg]

m_e : エンドエフェクタ質量 [kg]

k_s : 力センサばね定数 [N/m]

* 釧路高専機械工学科

- m_0 : 対象物質量 [kg]
- k_{o1}, k_{o2} : 対象物ばね定数 [N/m]
- c_{o1}, c_{o2} : 対象物減衰係数 [Ns/m]
- $u(t)$: 制御力 [N]
- $f_s(t)$: センサ出力 [N]
- $f_o(t)$: 押しつけ力 [N]
- $d(t)$: 外乱 [N]

となる。上記以外の A の成分は 0 である。また、一般的な外乱入力とするため $d \neq b$ とする。

ここで、対象物への作用力 $f_o(t)$ を定常偏差なく目標値 f_{od} に追従させるため、最適サーボ力制御系を構成する^{8,9)}。ただし、 $f_o(t)$ は $x_e(t)$, $\dot{x}_e(t)$, $x_o(t)$, $\hat{x}_o(t)$ をオブザーバにより推定する。

まず、新しい制御力 $v(t)$ を用いてシステムを以下の微分系に拡大する。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) \\ \dot{u}(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} A & b \\ \theta_{1,6} & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x(t) \\ u(t) \end{cases} + \begin{cases} \theta_{6,1} \\ 1 \end{cases} v(t) + \begin{cases} d \\ 0 \end{cases} d(t) \quad (2)$$

よって、

$$\begin{aligned} \dot{x}_e(t) &= A_e x_e(t) + b_e v(t) + d_e d(t) \\ f_s(t) &= \{c \ 0\} x_e(t) = c_e x_e(t) \quad (3) \\ f_o(t) &= c_o x(t) = \{c_o \ 0\} x_e(t) = c_{oe} x_e(t) \end{aligned}$$

が仮想的な制御対象となる。

ここで偏差 $\delta x(t)$, $\delta u(t)$ に対する偏差システム、

$$\begin{aligned} \delta \dot{x}_e(t) &= A_e \delta x_e(t) + b_e v(t) + d_e d(t) \\ f_o(t) - f_{od} &= c_{oe} \delta x_e(t) \quad (4) \end{aligned}$$

を考えると、無限時間において $\delta x_e(t) \rightarrow 0$ と $f_o(t) \rightarrow f_{od}$ を達成でき、

$$\begin{cases} x_s \\ u_s \end{cases} = Z^{-1} \begin{cases} -dd(t) \\ f_{od} \end{cases}, Z^{-1} = \begin{bmatrix} A & b \\ c_o & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

となる。また有限時間では、

$$\begin{cases} x(t) \\ u(t) \end{cases} = Z^{-1} \begin{cases} \dot{x}(t) - dd(t) \\ f_o(t) \end{cases} \quad (6)$$

である。

この偏差システムに次の二次評価関数、

$$J_e = \int_0^{\infty} (\|\delta x_e\|^2 r_e + v(t)^2 r_v) dt \quad (7)$$

を適用し、重み係数を $Q_e = c_e^T r_e c_e$ の半正定対称行列に選ぶと、

$$J_e = \int_0^{\infty} (\|f_o(t) - f_{od}\|^2 + r_e^2 v(t)^2) dt \quad (8)$$

と書き換えることができる。 r_e は拡大系の制御力 $v(t)$ の重み係数であり設計変数となる。

このとき、 J_e を最小にするレギュレータの解は、

$$v(t) = r_e^{-1} b_e^T P_e \delta x_e(t) = -F_e \delta x_e(t) \quad (9)$$

で与えられ、最適フィードバックゲイン F_e により拡大系の制御力 $v(t)$ を決定できる。ただし P_e はリカッチ方程式、

$$A_e^T P_e + P_e A_e + Q_e - P_e b_e r_e^{-1} b_e^T P_e = 0 \quad (10)$$

の正定対称解である。

式 (9) は $\delta x_e(t)$ で記述されているため、式 (5), (6) を用いて実系に変換する。

$$\begin{aligned} v(t) &= -F_e \begin{cases} \delta x(t) \\ \delta u(t) \end{cases} = -F_e \begin{cases} x(t) \\ u(t) \end{cases} + F_e \begin{cases} x_s \\ u_s \end{cases} \\ &= -F_e Z^{-1} \begin{cases} \dot{x}(t) - dd(t) \\ f_o(t) \end{cases} + F_e Z^{-1} \begin{cases} dd(t) \\ f_{od} \end{cases} \quad (11) \\ &= -K_1 \dot{x}(t) + K_2 \{f_{od} - f_o(t)\} \end{aligned}$$

ここで、上式を 0 から t まで積分すると実系の制御力 $u(t)$ は、

$$u(t) = K_1 x(t) + K_2 \int_0^t \{f_{od} - f_o(t)\} dt + K_1 x(0) \quad (12)$$

となり、比例行列ゲイン K_1 (状態フィードバック) と積分スカラーゲイン K_2 (フィードフォワード) からなる最適制御則を得る。これは、プロセス制御の PI 制御の考えに対応する。

よって、 $x(0)=0$ で最適ロバストサーボ系、

$$\begin{cases} \dot{x}(t) \\ z(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} A - bK_1 & bK_2 \\ -c_o & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x(t) \\ z(t) \end{cases} + \begin{cases} dd(t) \\ f_{od} \end{cases} \quad (13)$$

を実現できる。ただし $z(t)$ は 1 型積分器である。

一般に安定化補償器としてオブザーバを用いる。オブザーバにはルーエンバーガ型とカルマン型があるが、ここでは最適理論が使えるカルマンフィルタ型同次元オブザーバを用いる。オブザーバを用いても最適制御と最適推定の問題は分離される。

そこで、オブザーバモデルを、

$$\dot{\hat{x}}(t) = A \hat{x}(t) + b u(t) + d d(t) \quad (14)$$

とおく。ここで、制御力 $u(t)$ は制御対象に印加するものと同一量を用い、上記モデルの出力誤差をモデルにフィードバックする。すると、状態推定値はセンサ出力 $f_s(t)$ の確定値を用いて推定できる。

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - bK_1 - Lc) \hat{x}(t) + L f_s(t) + bK_2 z + dd(t) \quad (15)$$

ここに、 L はフィルタゲインである。 L の計算方法

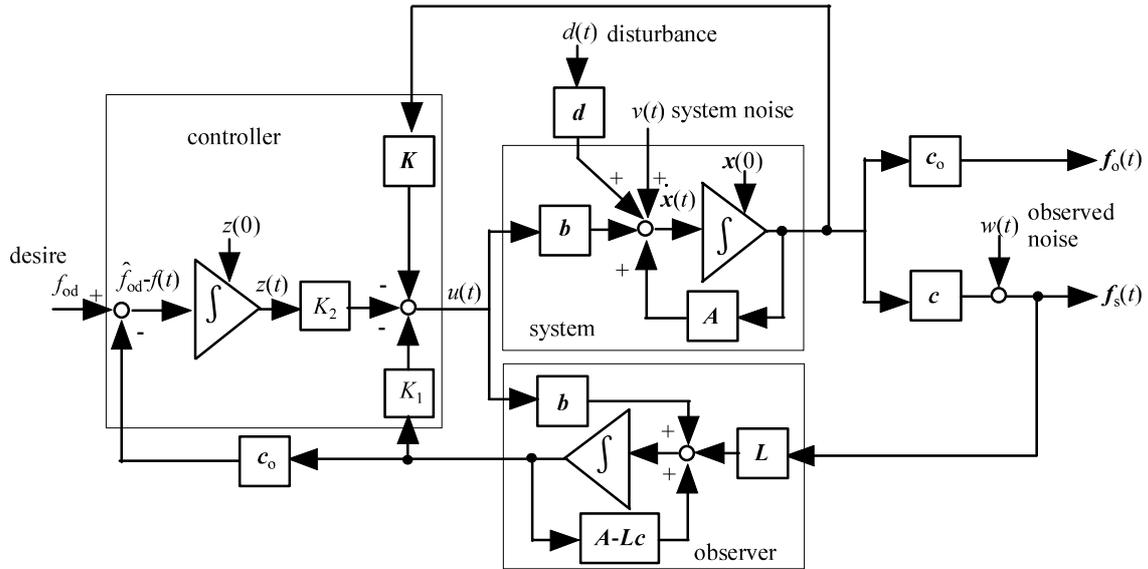


Fig.2 Block diagram servo control with observer

は文献10にゆずる。

したがって、 $\hat{x}(t)$ から押しつけ力,

$$\hat{f}_o(t) = c_o \hat{x}(t) \quad (16)$$

が推定できる。本系のブロック線図をFig.2に示す。

オブザーバの状態推定過程は推定誤差,

$$e(t) = \hat{x}(t) - x(t) \\ = \exp[(A - bK_1 - Lc)t]e(0) \quad (17)$$

の遷移となり、初期推定 $e(0)$ によらず安定収束するので、サーボ特性をシミュレーション上で確認できる。また、オブザーバの極はサーボの極より複素左半面に位置するように設計する。

3. 計算事例

具体例として、ステップ状指令値 $f_{od} = 1[N]$ に対する $f_o(t)$ の追従性を取り上げる。実験装置の外観が

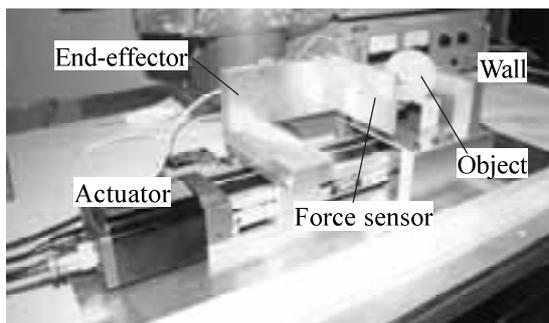


Fig.3 Force control of SDOF manipulator

Table1 System parameter

manipulator	$m_a = 3\text{kg}, m_e = 1\text{kg}, k_s = 7 \times 10^4 \text{N/m}$	
object (ball)	hard type	soft type
m_o	$2.01 \times 10^{-3} \text{kg}$	$2.52 \times 10^{-3} \text{kg}$
k_{o1}, k_{o2}	$5.25 \times 10^3 \text{N/m}$	$4.20 \times 10^2 \text{N/m}$
c_{o1}, c_{o2}	$8.7 \times 10^{-1} \text{Ns/m}$	$6.9 \times 10^{-1} \text{Ns/m}$

Fig.3である¹¹⁾。DCモータの回転駆動をボールねじを介して並進運動に変換し、LMガイド上のエンドエフェクタを動かす。エンドエフェクタにはひずみゲージ貼付の力センサが取り付けられており、押しつけ力を検出する。対象物は硬式および軟式テニスボールとした。マニピュレータと対象物の諸パラメータを表1に示す。必要なばね定数は曲げ試験、粘性係数(減衰比)は自由振動波形より求めた(付録)。

3.1 極配置について

まず前の非サーボ時のシステム極を確認したところ以下となり、

hard type	$-182, -12.6 \pm 113.1i, -3.99 \pm 327i, 128$
soft type	$-62.5, -9.53 \pm 30.9i, -0.279 \pm 306i, 26.6$

正極があるため押しつけ力は発散する。

サーボ系の構成としては、 r_c を大きくすると制御力が働き制振性が向上するが、ここではサーボ特性を評価するため、やや振動的で即応性がある $r_c = 0.01$ を与えた。

したがってサーボの極は、

hard type	-182, -126, -30.5, -15.7 ± 115i, -4.85 ± 327i
soft type	-62.3, -25.4 ± 8.2i, -9.84 ± 33.8i, -3.93 ± 306.2

となり、代表特性根が負となり全極が安定根となる。 Q_e は速度を戻さないため、極の減衰性は変化しない。

次にオブザーバの設計であるが、システム雑音 Γ と観測雑音 Σ を以下で与えた。

$$\Sigma = 1 \times 10^5, \Gamma = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

結果として、オブザーバの極は次のようになり、サーボの極の左半面に位置させることができた。

hard type	-758, -589 ± 113i, -580 ± 327i, -449
soft type	-428, -375 ± 30.9i, -339, -336 ± 306i

以上の極配置設計では全て非外乱で行った。結果をFig. 4に示す。

3. 2 目標値定常偏差

サーボ制御を行った場合がFig.5である。サーボ特性をみるためオブザーバの推定初期値を $\hat{x}(0)=0$ とおいた。整定時間をみると、硬式で約0.3秒、軟

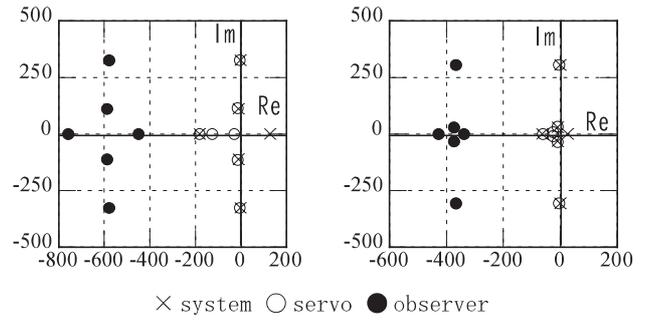
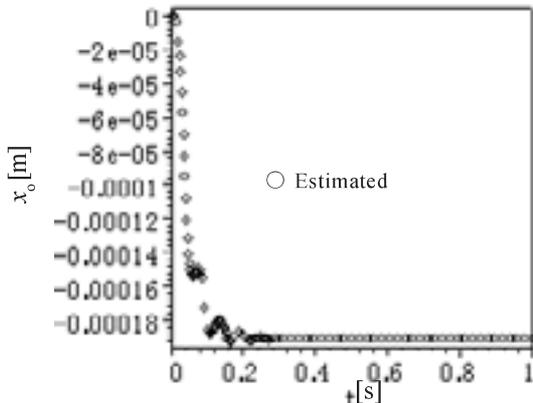


Fig.4 Pole distributions

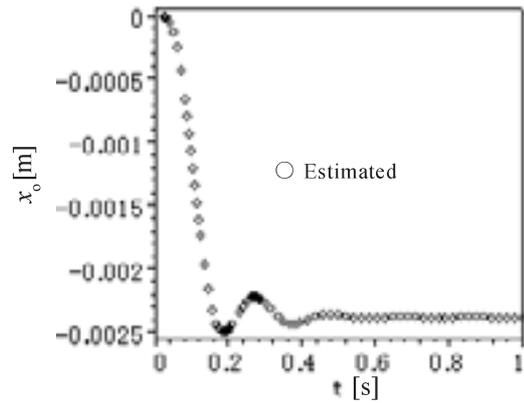
式で約0.5秒となっており、定常偏差なく目標値1Nに達していることが分かる。この条件では、軟式の場合に押しつけ力にオーバーシュートがみられたが、ボール押しつけ変位も一定値に収束しており、押しつけ変位と押しつけ力の平衡点でバランスするようにマニピュレータの制御力が働いていることが分かる。

また、オブザーバによる状態推定についても追従性のあることが分かる。

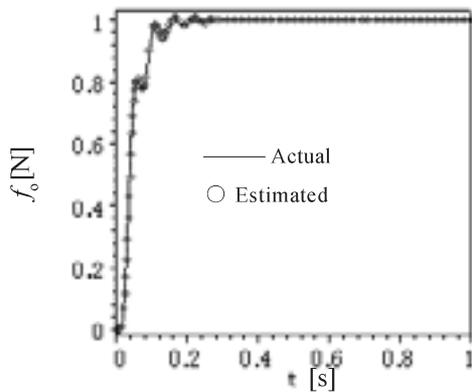
3. 3 オブザーバの推定遷移



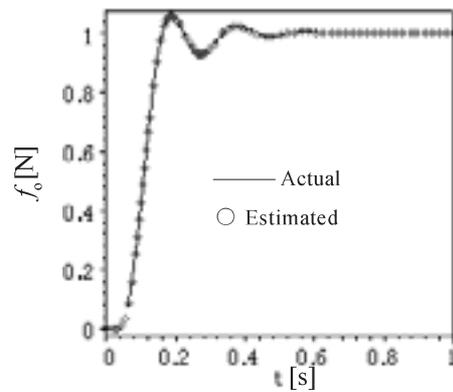
(b) Estimate time histories of object displacement for hard object



(d) Estimate time histories of object displacement for soft object



(a) Actual and estimate time histories of pressure force for hard object



(c) Actual and estimate time histories of pressure force for soft object

Fig.5 Force control with servo control theory using observer

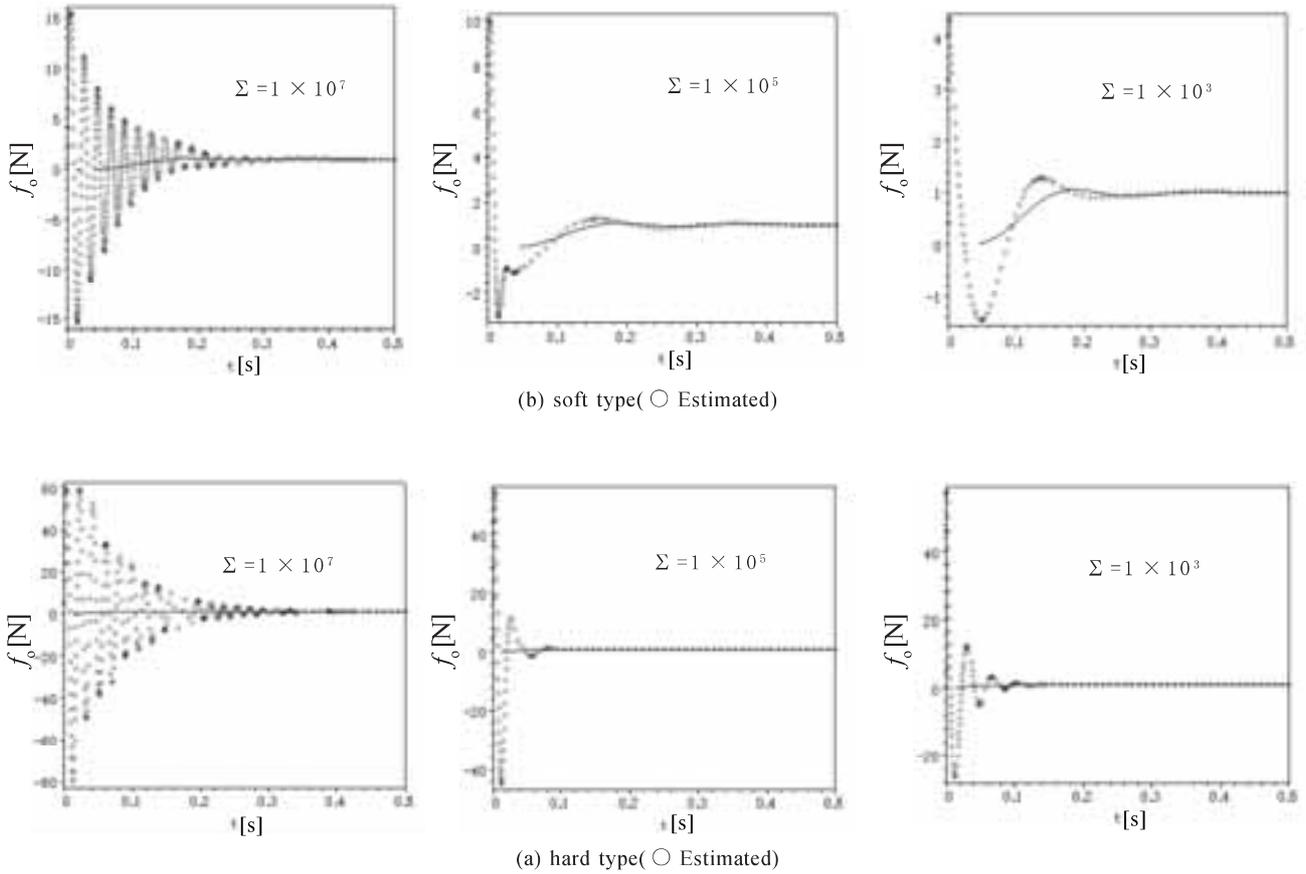


Fig.6 Estimate time histories of object force for external disturbance $x_e=1 \times 10^{-3}$ [m] ($\Gamma=\text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$)

オブザーバの初期値誤差による推定状況の様子が Fig.6 である。まず初期値として、

$$e(0)=\{0,0,1 \times 10^{-3},0,0,0\}$$

つまり、エンドエフェクタ変位 x_e に初期推定誤差 1×10^{-3} [m] を与えた場合である。さらに、オブザーバの感度として、 $\Sigma=1 \times 10^7$, 1×10^5 , 1×10^3 の3通りを検討した。 1×10^7 の場合に推定値も大きく離れ波形も振動的となっている。これは、 Σ が大きいと制御力が小さくなるためである。一方、制御力ウェイトを大きく、 1×10^5 , 1×10^3 と与えると誤

差振幅も小さくなり安定した推定機構を与える。この傾向は硬式、軟式によらず同じであった。

3. 4 定値外乱に対して

1型の積分要素を持つため定値持続外乱に対して有効である。硬式ボールについて、目標値 $f_{od}=1$ [N], 定値外乱 $d=1$ [N] を与え、さらにマニピュレータ、エンドエフェクタ先端および対象物押しつけ変位にそれぞれ +5mm の初期変位を与えた結果が Fig. 7 である。初期時間で逆ぶれ制御が行われるものの、0.5~0.6秒で目標値に達しておりロバス

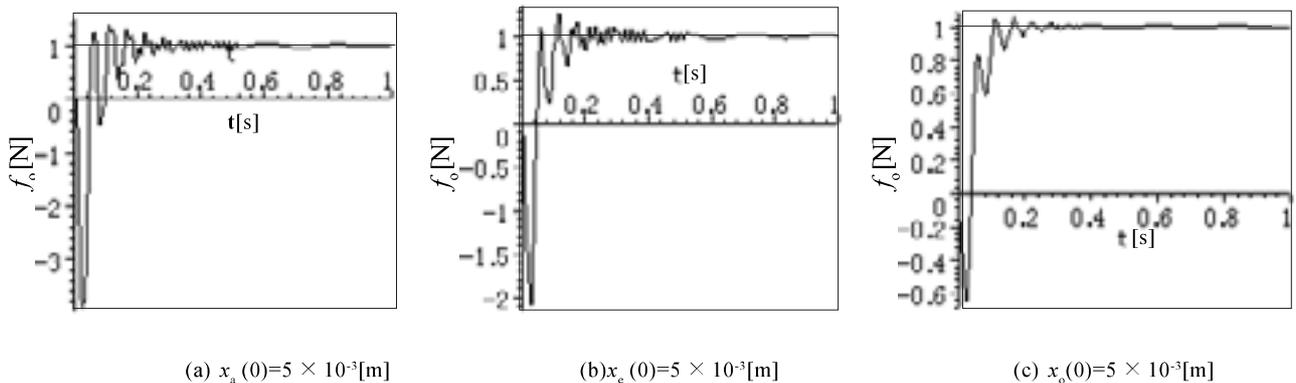


Fig.7 Influence of external disturbance of hard object($d=1$ [N])

ト性を示している。

3. 5 パラメータ変動に対して

物理パラメータ m_0 , k_{01} , c_{01} の値が 50% 変化した場合を取り上げる。 $A[6,2]$ 成分を $k_{01} \rightarrow k_{01} \times 0.5$, $A[6,5]$ 成分を $c_{01} \rightarrow c_{01} \times 0.5$ および $m_0 \rightarrow m_0 \times 0.5$ と変化させた 3 通りについて試みた。Fig. 8 は k_{01} が変化した場合の硬式と軟式の目標値応答である。定常偏差の少ないロバスト性を確認することができた。

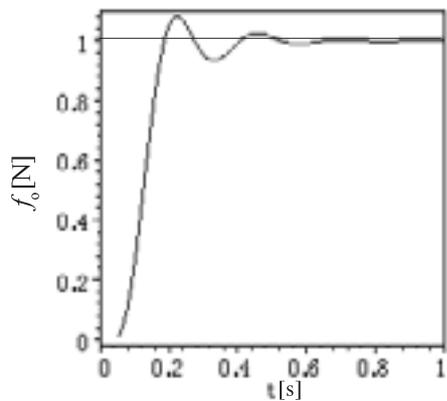
4. おわりに

1 自由度マニピュレータの力制御問題に最適サーボ理論を用いて追従性とロバスト性を検討した。まず積分動作コントローラによる持続定値外乱に対するレギュレータを設計し、定常偏差のない目標値応答を実現した。併せてオブザーバの感度およびシステムパラメータの変動がサーボ性に与える影響について検討した。本報告は異方性構造の構造系設計と制御系設計のハイブリッド設計の基礎を与えるものである。最後に、実験装置製作に真摯に取り組んだ平成 6 ~ 10 年度の都立高専

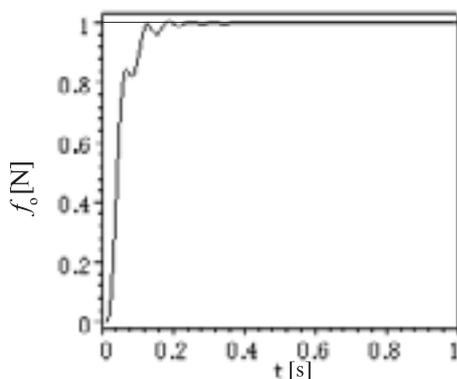
の卒研生に感謝する。

参考文献

- (1) 小林・山田・小野, 直交異方性を有する片持ち長方形板の振動制御, 機論(c), **58**-503, (1992), 37-42.
- (2) T. NARISAWA and S. AOKI., Uncertainty Analysis for Control of Single-Degree-of-Freedom Manipulators., In. Conf. MOVIC, (1994), 210-215.
- (3) 成澤, 動特性の変化に伴う不確定モデルの変動解析 (1 自由度マニピュレータの制御安定性への適用), 都立高専研究報告書, **29**, (1994), 17-23.
- (4) T. NARISAWA, Influence of Change in Object Dynamics on Control Stability for SDOF Manipulators., Report of TMCT, **32**, (1995), 22-31.
- (5) 成澤, 1 自由度マニピュレータの PID 力制御, 都立高専研究報告書, **32**, (1996), 11-14.
- (6) 吉川・梅野, 対象物体ダイナミクスを考慮した動的ハイブリッド制御, 日本機械学会ロボティクス・ダイナミクス講演会, 920-33(A), (1992), 401-404.
- (7) A. UMENO, K. SHIMOKURA and T. KAKIZAKI., Dynamics Modeling of Robot Force Control System and its Application to A Parts Holding Task., In. Conf. MOVIC, (1992), 459-464.
- (8) 古田・川路・見多・原, メカニカルシステム制御, オーム社, (1984).
- (9) 小郷・美多, システム制御理論入門, 実教出版, (1991).
- (10) 成澤, 連続体モデルの振動モード推定法について, 釧路高専紀要, **38**, (2004), 7-13.
- (11) 鈴木・柏木, 力制御能力をもった 1 自由度マニピュレータの製作, 都立高専卒業論文, (1994).



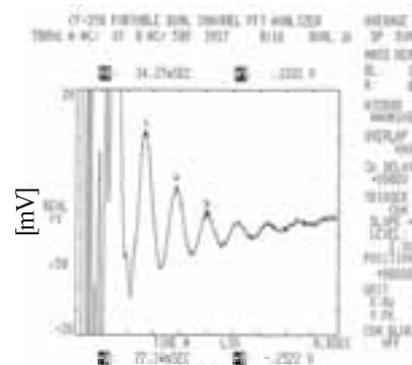
(b) soft type



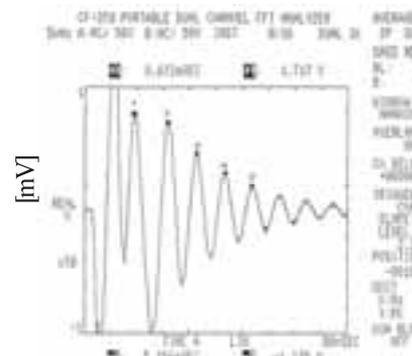
(a) hard type

Fig.8 Influence of perturbed object spring constant ($\Delta k_{01}=0.5[N/m]$)

付録



(b) soft type



(a) hard type

Damping ratio of object