

不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御則：仮想目標点によるチャタリングの低減化

Sakamoto, N. / Masubuchi, M. / 増淵, 正美 / 坂本, 憲昭

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学工学部研究集報 / 法政大学工学部研究集報

(巻 / Volume)

28

(開始ページ / Start Page)

27

(終了ページ / End Page)

38

(発行年 / Year)

1992-02

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003890>

不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御則⁺ —仮想目標点によるチャタリングの低減化—

坂本憲昭*・増淵正美**

A Robust Control Strategy for Linear Systems having Uncertainties —A Proposal of Moving Attractor—

N.Sakamoto* and M.Masubuchi**

As the robust control strategy which assures stability for linear systems having uncertainties caused by parameter variations, the one using linear and nonlinear laws by G.Leitmann and others based on the second method of Lyapunov has been known in these ten years.

For this control strategy, however, saturating function approximating discontinuous function is used and it has been pointed out when implemented to existing plant that chattering may be generated at the manipulating variable due to the input delay caused by the sampling time in the computer system.

This paper proposes a new algorithm of Moving Attractor to reduce this chattering effect. The control deviation is not evaluated by using the existing deviation but by using the deviation between the Moving Attractor and controlled variables. Position of Moving Attractor is first given at a prescribed place and then is moved to the position of real command under some given rule. The rule of Moving Attractor which assures uniform boundedness and uniform ultimate boundedness is derived.

It is shown by an example of a robotic arm that the chattering at the manipulating variable is remarkably reduced under this proposed system.

+ 計測自動制御学会にて一部発表

*大学院工学研究科システム工学専攻

**工学部電気工学科計測制御

1. はじめに

実在するシステムを微分方程式による数学モデルで表現した場合に、その応答は実在システムの応答とは異なることが少なく、現実とは一致しないことがほとんどであり、その原因の一つに把握できない不規則なパラメータ変動がある。これを無視して制御則を決定すれば、その不確かさにより所要の応答を得られなかったり、システムが不安定になったりすることがある。そのような不確かさをもつ動的システムに対し安定性を保証するロバストな制御則として、Lyapunovの定理による線形+非線形な制御則が提案されている。この制御則の集大成については、Y. H. Chenの論文[8]があり、展望については、M. CorlessとG. Leitmannの論文[9]がある。

この制御則はVSC(Variable Structure Control)と同様に切換面を状態空間内に設定し、状態ベクトルをその切換面に拘束することによってロバスト性をもたらすものである^[6]。初期に提案された制御則^[11]は、sgn関数を用いる不連続関数であったが、入力が激しいチャタリングを起こすために、それを飽和関数により連続化することが提案された。これには二つの手法があり以下に概要を示す。

第一はFig.1(a)に示すように切換面を緩和する領域を設定する方法である^{[12], [13]}。

$$u(t) = \begin{cases} -\text{sgn}(B' LX) \cdot \rho(X) & \text{if } \|B' LX\| > \epsilon \\ -\frac{B' LX}{\epsilon} \cdot \rho(X) & \text{if } \|B' LX\| \leq \epsilon \end{cases}$$

LはLyapunov方程式の解であり、B' LXは切換面を表す。 $\rho(X)$ は対象システムの最大の不確かさを含んだ状態に対応する正のスカラー値関数である。 ϵ は任意に与える小さな正の定数である。 $\rho(X)$ の係数をsgn関数による不連続ではなく、Fig.1(a)に示すように $\|B' LX\| \leq \epsilon$ のとき連続となるようにする。

第二の手法はG. Ambrosinoらによる^{[6], [14]}。

$$u(t) = \frac{B' LX}{\|B' LX\| + \delta} \cdot \rho(X)$$

δ は任意の小さな正の定数である。Fig.1(b)に示すように、前者よりも操作量がさらに滑らかになる。

sgn関数による制御則は一様漸近安定性を保証するが、上記の連続化した制御則は、対象システムが平衡点を中心とする領域に収束すること(一様終局有界性)を保証する。本稿では、この領域を終局有界領域と呼ぶ。領域の大きさは ϵ 、 δ の値によって左右され、 ϵ 、 δ の値を小さくするほど終局有界領域が小さくなる。

この制御則を実システムに適用する場合、アナログ制御によれば滑らかな操作量を実現する^[15]が、本質的には不連続関数を近似した飽和関数であるため、コンピュータ制御などにおいて入力

に遅れ時間をもつと、切換面近傍において操作量がチャタリングを起こすことが指摘されている^[15]。入力の遅れに応じて操作量のより大きな振幅の振動、また高速なサンプリングでは振幅は小さいが周波数の高いチャタリングを招く。一方、 ϵ 、 δ の値を大きく設定して切換面近傍における操作量を小さくし、状態が切換面を大きく行き過ぎるのを避けることが考えられるが、 ϵ 、 δ の値に対応して終局有界領域が大きくなる。したがって、平衡点への漸近性とチャタリングの低減との間にトレードオフを行う必要がある^[4]。チャタリングは操作部を破壊する恐れがある他、モデル化していないシステム特性と共振を起こす可能性がある^[4]。

一方、杉江・大須賀・小野らは二重構造ロバストモデル追従制御則^{[10] - [12]}を提案した。これはパラメータ変動をもつロボットマニピュレータのモデル追従制御問題を考える場合、先に示した制御則では初期誤差収束特性を指定できない欠点があり、これを補うために対象システムが追従すべき中間線形動的モデルを導入したものである。

また、吉川ら^[16]は、マニピュレータのもつ構造を最大限利用して切り換え操作量をさらに低減化することを図っている。

著者らは従来G. Leitmannらの応答を観察し、状態点が平衡点に近いときはチャタリングが微少で、遠いときは行き過ぎを起こしてチャタリングが大きくなっている事実を知り、まず、最初に質量を全く考慮していない仮想的な目標点を切換面上の状態点の近くにおき、状態点がそれに向かって動き出す頃に、それよりやや早めにその仮想目標点を真の目標点方向に動かすことを考えた。つまり、常に状態点と目標値との距離を小さくしておき、操作量を低減させて操作の行き過ぎを小さくすることによって、チャタリングを低減させることにした。これは、終局有界領域の大きさを変更せずに操作量のチャタリングを低減化する方法である。Fig. 2に示すように実際の偏差をもとに操作量を計算するのではなく、切換面上を移動する仮りの目標値（以後、仮想目標点 $M(t)$ と称する）からの偏差によって操作量を求めるものであり、その結果、 $\rho(X)$ が小さくなって、チャタリングが低減される。さらに本論文で提案する方法により仮想目標点を移動すれば、対象システムの一様有界性と一様終局有界性が保証されることを示す。

以下、対象システムは線形不確定システムに限定して仮想目標点の構成を説明し、最後に簡単な力学系についてチャタリング低減の効果をシミュレーションによって示した。

2. 不確かさのあるシステムの制御^{[2], [3]}

2.1 対象となる線形不確定動的システム

$$\dot{X}(t) = [A + \Delta A(r(t))] X(t) + [B + \Delta B(s(t))] u(t) + C v(t), X(t_0) = X_0 \quad (\text{未知}) \quad (2.1)$$

$$X \in R^n, u \in R^m, r \in R^p, s \in R^q, v \in R^l$$

ここで、 A は定数 $n \times n$ 行列、 B は定数 $n \times m$ 行列、 C は定数 $n \times \ell$ 行列である。また、 ΔA はパラメータ r による $n \times n$ システム行列の不確定量、 ΔB はパラメータ s による $n \times m$ 入力行列の不確定量、 Cv は外乱を表す。

$X(t)$ は時刻 t におけるシステムの状態を表し、 $X = \{0\}$ を平衡点とする。したがって、 $X(t)$ は平衡点からの偏差を表す。制御目的はこの偏差を零にすることである。 $u(t)$ は時刻 t における操作量を表す。

(2.1)のシステムは次のような仮定を満足するものとする。

- (1) $\Delta A(\cdot)$, $\Delta B(\cdot)$ はあらかじめ規定された関数であり、それぞれ R^p , R^q において連続である。
- (2) 不確定パラメータ $r(\cdot) : R^1 \in R$, $s(\cdot) : R^1 \in S$, $v(\cdot) : R^1 \in V$ はルベグ可測であり、ここで $R \in R^p$, $S \in R^q$, $V \in R^l$ は適当な空間のあらかじめ規定されたコンパクトな部分集合である。
- (3) (A, B) は可制御である。
- (4) 次のような D, E, F 行列が存在する。

$$\Delta A(r) = B D(r) \quad \forall r \in R \quad R^p \text{で連続な } D(\cdot) \text{ の存在} \tag{2.2}$$

$$\Delta B(s) = B E(s) \quad \forall s \in R \quad R^q \text{で連続な } E(\cdot) \text{ の存在} \tag{2.3}$$

$$C = B F \quad \text{定数行列 } F \text{ の存在} \tag{2.4}$$

これはいわゆるマッチング条件とよばれており、この条件を緩和する研究が文献 [7] で論じられている。

- (5) すべての $(X, t) \in R^q \times R$ において

$$\max_{s \in S} \|E\| < 1 \tag{2.5}$$

2.2 従来の制御則^{(2), (3)} について

(2.1)の安定性を保証する制御則として、G. Leitmannらは次式を提案している。

$$u = KX + p(X) \tag{2.6}$$

$$p(X) = \begin{cases} -\text{sgn}(B' LX) \cdot \rho(X) & \text{if } \|B' LX\| > \epsilon \\ -\frac{B' LX}{\epsilon} \cdot \rho(X) & \text{if } \|B' LX\| \leq \epsilon \end{cases} \tag{2.7}$$

$$\tag{2.8}$$

KX はノミナルシステム(不確かさを零とおいた)を制御するための線形フィードバックである。

$$\bar{A} \triangleq A + BK \tag{2.9}$$

$p(X)$ は不確かさを保証する操作量、 L はLyapunov方程式

$$L\bar{A} + \bar{A}'L + Q = 0 \quad (Q : \text{任意の正定対称行列}) \tag{2.10}$$

の解である正定対称行列である。

(2.2)~(2.4), (2.6)を(2.1)に代入し、不確かさをまとめた $e(X, t)$ を(2.12)のように定義する。

$$\dot{X} = \overline{A}X + Bp(X) + Be(X, t) \tag{2.11}$$

$$e(X, t) \triangleq DX + EKX + Ep(X) + Fv \tag{2.12}$$

$$\|e(X, t)\| \leq \rho(X) \tag{2.13}$$

(2.13)から $\rho(X)$ を求める。 $\rho(X)$ はある状態におけるすべての許容した不確かさの最大値を表す。仮定(5)より、

$$\rho(X) \triangleq (1 - \max_{s \in S} \|E\|)^{-1} (\max_{r \in R} \|DX\| + \max_{s \in S} \|E\| \cdot \|KX\| + \max_{v \in V} \|Fv\|) \tag{2.14}$$

$$\leq a + b \|X\| \tag{2.15}$$

$$\begin{cases} a = (1 - \max \|E\|)^{-1} (\max \|Fv\|) \\ b = (1 - \max \|E\|)^{-1} (\max \|D\| + \max \|EK\|) \end{cases}$$

定理(1)

仮定(1)~(5)を満足するシステム(2.1)に(2.6)を適用する。そのとき、あらゆる初期条件において(2.1)の一様有界性および一様終局有界性を保証する。この終局有界領域は、半径 r の球によって与えられる。

$$r = \frac{\epsilon a}{4 \lambda_{\min}(Q)} + \left[\left(\frac{\epsilon a}{4 \lambda_{\min}(Q)} \right)^2 + \frac{\epsilon b}{2 \lambda_{\min}(Q)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$\lambda_{\min}(Q)$ は Q の最小固有値を表す。証明は、文献[2], [3]を参照。

3. 仮想目標点の導入

前章に紹介した制御則(2.6)~(2.8)は理論的には連続な制御則であるが、すでに述べたように入力に切り換え遅れがあるときは保証する終局有界領域の大きさとチャタリング低減化との間にトレードオフ関係処理する必要がある。そこで著者らは新たに仮想目標点の導入を提案する。これは、Fig.2に示すように切換面上に仮想目標点 $M(t)$ を設定してそれを移動させ、その仮想目標点 $M(t)$ と状態 $X(t)$ との間の偏差を(3.1)のように $\overline{X}(t)$ と定義して、それにより操作量を求めるものである。

$$\overline{X}(t) \triangleq X(t) - M(t) \tag{3.1}$$

書き直すと、

$$[\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]' = [x_1, x_2, \dots, x_n]' - [m_1, m_2, \dots, m_n]'$$

この仮想的な偏差 $\overline{X}(t)$ を用いるには、(2.7)の $\rho(X)$ 中の $X(t)$ を $\overline{X}(t)$ に置き換えて、 $\rho(X)$ を

小さくすることにより操作量を減らし、チャタリングの低減化を考えることにする。

以下では対象システムの一様有界性と一様終局有界性を保証する、仮想目標点 $M(t)$ の設定および移動方法について述べるために、まず定理(2)を示す。

定理(2)

仮定(1)~(5)を満足するシステム(2.1)を考える。仮想目標点 $M(t)$ を切換面上にて次の方法により移動させた場合、(2.7)の $\rho(X)$ 中の $X(t)$ を(3.1)による偏差 $\bar{X}(t)$ に置き換えて求めた操作量は、すべての許容する不確かさについて、 $\|B' LX\| > \epsilon$ を満足する対象システムの状態の一様有界性を保証する。さらに、その仮想目標点 $M(t)$ を最終目標値である平衡点に有限時間で到達させることで、一様終局有界性を保証する。

仮想目標点 $M(t)$ の移動は、次式のように切換面上を初期位置 $M(0)$ と速度 β を与えて動かす。

$$\begin{cases} M(t) = M(0) \cdot \exp[-\beta(t)] \\ B' LM(t) = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\beta \geq (1/2 \lambda_{\max}(Q^{-1}L)) \quad (3.3)$$

$\lambda_{\max}(Q^{-1}L)$ は $Q^{-1}L$ の最大固有値を表す。初期位置 $M(0)$ は次式により算出する。

$$\begin{cases} \|M(0)\| = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B'L\|(\max_{r \in R} \|D\| + \max_{s \in S} \|EK\|)} \cdot \|X(0)\| \\ B' LM(0) = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

証明

仮想目標点 $M(t)$ を有限時間で $M(t) \rightarrow X = \{0\}$ (平衡点) に到達させるので、一様終局有界性については定理(1)がそのまま成立する。ここでは仮想目標点 $M(t)$ からの偏差 $\bar{X}(t)$ を与え、その $\bar{X}(t)$ による $\rho(\bar{X})$ をもちいた操作量(2.6)、すなわち $u = KX + p(\bar{X})$ が、対象システムの一様有界性を保証することを証明する。

システム(2.11)を次のように書き改める。

$$\dot{\bar{X}} = \bar{A}\bar{X} + Bp(\bar{X}) + Be(\bar{X}, t) + B(D + EK)M \quad (3.5)$$

$$e(\bar{X}, t) \triangleq D\bar{X} + E \cdot K\bar{X} + Ep(\bar{X}) + Fv \quad (3.6)$$

$$\|e(\bar{X}, t)\| \leq \rho(\bar{X}) \quad (3.7)$$

Lyapunov関数候補を

$$V(X(t)) = X' LX \quad (3.8)$$

とする。Lyapunov導関数は、

$$\dot{V}(X) = -X'QX + 2X'LB[p(\bar{X}) + e(\bar{X}, t) + (D + EK)M] \quad (3.1) \quad \bar{X} = X - M \text{ より}$$

$$= -X'QX + 2(B'L\bar{X})'[p(\bar{X}) + e(\bar{X}, t) + (D + EK)M] + 2(B'LM)'[p(\bar{X}) + e(\bar{X}, t) + (D + EK)M] \quad (3.2) \quad B'LM = 0 \text{ より}$$

$$= -X'QX + 2(B'L\bar{X})'[p(\bar{X}) + e(\bar{X}, t)] + 2(B'L\bar{X})'(D + EK)M \quad B'L\bar{X} = B'L(X - M) = B'LX \text{ より}$$

$$= -X'QX + 2(B'LX)'[p(\bar{X}) + e(\bar{X}, t)] + 2(B'LX)'(D + EK)M \quad (3.9)$$

文献 [3] より、(3.9)の第二項は $\|B'LX\| > \epsilon$ ならば常に零となる。

$\|B'LX\| > \epsilon$ に限れば、 $\dot{V}(X) \leq 0$ となる条件は

$$0 < \lambda_{\min}(Q) \|X\|^2 \leq X'QX \leq \lambda_{\max}(Q) \|X\|^2 \quad (3.10)$$

より、(3.9)の第一項の最小値、および第三項の最大値を考えて、

$$\dot{V}(X) \leq -\lambda_{\min}(Q) \|X\|^2 + 2\|B'L\| (\max_{r \in R} \|D\| + \max_{s \in S} \|EK\|) \|M\| \cdot \|X\|$$

$\dot{V}(X) \leq 0$ となるためには $\|X\| \geq 0$ であるから、

$$\lambda_{\min}(Q) \|X\| - 2\|B'L\| (\max_{r \in R} \|D\| + \max_{s \in S} \|EK\|) \|M\| \geq 0$$

であればよい。したがって、

$$\|M(t)\| \leq \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B'L\| (\max_{r \in R} \|D\| + \max_{s \in S} \|EK\|)} \|X(t)\| \quad (3.11)$$

$t = 0$ のとき、仮想目標点を状態点により近い位置に置くことを考えて

$$\|M(0)\| = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B'L\| (\max_{r \in R} \|D\| + \max_{s \in S} \|EK\|)} \|X(0)\| \quad (3.12)$$

によって初期位置を定める。そして、 $\|X(t)\|$ の減衰速度よりも速く $M(t)$ を移動させれば(3.11)を満足することになる。この $\|X(t)\|$ の減衰速度は文献 [5] に示されており、

$$\|X(t)\| \leq \|X(0)\| \cdot \exp[-t/2\lambda_{\max}(Q^{-1}L)] \quad (3.13)$$

この減衰速度よりも速く $M(t)$ を移動するには、

$$\beta \geq [1/2\lambda_{\max}(Q^{-1}L)]$$

とすればよい。

なおチャタリング低減をめざす場合、まず第一に状態点と仮想目標点の距離が近い方が偏差が小さくなり、それに応じて操作量が小さくなりチャタリングの低減化に有効である。したがって、定理(2)を満足させて、かつ、初期状態の近くに仮想目標点の初期位置を設定する必要がある。一例として、(3.4)を満足する範囲が、超球(半径を $\|M(0)\|$ とする)と切換面 ($B'LX=0$)との交線、すなわち円周となる場合、その円周上のうち初期状態と最も近い位置を仮想目標点の初期位置とし、その点から真の目標値までの直線上を移動させればよい。

また、 $M(0)$ の設定方法は他にも考えられ検討すべき点があるが、このことは今後の検討課題としている。

4. 例題

仮想目標点 $M(t)$ の有効性を実証するために、簡単な例題により仮想目標点 $M(t)$ を適用しない場合と、適用する場合を比較する。以下では簡単なロボットアームの例題を検討する。

4.1 対象モデル

水平面を回転する簡単なアーム (Fig.3) を考える。

摩擦係数の変動 ΔC と負荷変動 Δm 、およびトルク変動 Δu が存在するとする。この運動方程式は、

$$\{J + Mr^2 + (m + \Delta m)l^2\} \ddot{\theta} + (C + \Delta C) \dot{\theta} = u + \Delta u$$

$$[x_1, x_2]^T \triangleq [\theta, \dot{\theta}]^T \text{ として書き改めれば、}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{C + \Delta C}{J + Mr^2 + (m + \Delta m)l^2} x_2 + \frac{u + \Delta u}{J + Mr^2 + (m + \Delta m)l^2} \end{cases}$$

また変動の情報はその最大値のみが既知と仮定する。これらを以下のようにおく。

$$|\Delta m| \leq 0.25 \text{ [Kg]}, \quad |\Delta C| \leq 0.01 \text{ [Nms / rad]}, \quad |\Delta u| \leq 0.1u \text{ [Nm]}$$

シミュレーションにおける仮定条件として、サンプリング周期は10msとし、 Δm については変動をFig.4のように与え、また ΔC 、 Δu については次式のように仮定した。

$$\Delta C = 0.01 \cdot \sin(\pi t), \quad \Delta u = 0.1 \cdot \cos(2\pi t)$$

このモデルに対して次の初期偏差を与える。

$$\text{初期偏差は } \theta(0) = -1.5\pi \text{ [rad]} \text{ とし、 } \dot{\theta}(0) = 0 \text{ [rad/s]} \text{ とおいた。}$$

4.2 制御則の決定

Fig.3に示す各値を代入して整理すれば、

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = (-0.342 + r) X_2 + (20.06 + s) u \end{cases}$$

$$r \in [-0.218 \quad 0.491], \quad s \in [-8.95 \quad 10.5]$$

制御則(2.6)を求める。 \bar{A} の極は $-1 \pm j$ 、また $Q = I$ と設定した。その結果、

$$K = [k_1, k_2] = [-0.0997 \quad -0.0826]$$

$$B' LX = 0.667x_1 + x_2 = 0$$

$$\rho(X) = 2.1(|0.0245x_2| + 0.523|k_1 x_1 + k_2 x_2|)$$

と求められた。ここで $\epsilon = \delta = 0.005$ と設定し、終局有界領域の半径 r は(2.16)より、0.022となる。

4.3 仮想目標点の適用

仮想目標点 $M(t)$ を(3.2)~(3.4)にもとづいて設定し、4.2節の $\rho(X)$ を

$$\rho(\bar{X}) = 2.1(|0.0245\bar{x}_2| + 0.523|k_1\bar{x}_1 + k_2\bar{x}_2|)$$

として求める。 β の値は0.7と設定した。

4.4 シミュレーション結果

制御量および入力トルクの時間経過をFig.5に示す。従来の制御則をそのまま適用した結果を(a),(c)に示す。なお、(c)は(2.7),(2.8)の代わりにG.Ambrosinoらによる飽和関数を用いたものである。著者らの提案する仮想目標点をそれぞれに適用した結果を(b),(d)に示す。なお、 $|\theta(t)| \leq 0.05$ [rad] を満足するまでの応答時間を調べ、その結果をFig.5に記入した。仮想目標点 $M(t)$ を導入することで明らかにチャタリングが低減することがわかる。同時に操作量が小さくなるため応答時間が多少悪化したが、その影響はわずかに2.5%以下であった。

5. おわりに

チャタリング低減化の程度を定量的に表現することは現在のところ困難であるが、提案する仮想目標点をG.Leitmannらによるロバスト制御則に適用することにより、一様終局有界領域の大きさ、およびサンプリング周期を変更せずに操作量のチャタリングを低減することができた。また、G.Ambrosinoらが提案する関数を用いた制御則に適用した場合でも、さらに低減できることを共にシミュレーションによって確認することができた。

問題点を挙げれば操作量が小さくなるために仮想目標点を導入しない場合に比べて応答時間がやや遅くなる。しかし、本例題の場合では2.5%以下程度の遅れであり、本稿では省略したが他のシミュレーション結果においても顕著な遅れはみられなかった。

参考文献

- [1] S.Gutman and G.Leitmann: STABILIZING FEEDBACK CONTROL FOR DYNAMICAL SYSTEMS WITH BOUNDED UNCERTAINTY, Proc. of IEEE Conference on Decision and Control, Gainesvill, Florida, WA2, 94/99(1976)
- [2] M.Corless and G.Leitmann: Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems, IEEE Trans., Automatic Control, Vol.26, No.5, 1139/1144(1981)
- [3] G.Leitmann: On the Efficacy of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems,

Trans. ASME, J.DSMC, Vol.102, No.2, 95/102(1981)

- [4] J.J.Slotine and S.S.Sastry: Tracking control of non-linear systems using sliding surface, with application to robot manipulators, INT.J.CONTROL, Vol.38, No.2, 465/492(1983)
- [5] G.Ambrosino, G.Celentano and F.Garofalo: Robust Model Tracking Control for a Class of Nonlinear Plants, IEEE Trans., Automatic Control, Vol.30, No.3, 275/279 (1985)
- [6] S.M.Madani-Esfahani, R.A.DeCarlo, M.J.Corless and S.H.Zak: ON DETERMINISTIC CONTROL OF UNCERTAIN NONLINEAR SYSTEMS, Proc. American Control Conf., Seattle, FA5, 1523/1528(1986)
- [7] Y.H.Chen: On the Robustness of Mismatched Uncertain Dynamical Systems, Trans. ASME, J.DSMC, Vol.109, No.3, 29/35(1987)
- [8] Y.H.Chen: Design of Robust Controllers for Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., Automatic Control, Vol.33, No.5, 487/491(1988)
- [9] M.Corless and G.Leitmann: CONTROLLER DESIGN FOR UNCERTAIN SYSTEMS VIA LYAPUNOV FUNCTIONS, Proc. American Control Conf., Atlanta, Georgia, F A12, 2019/2025(1988)
- [10] 大須賀、小野: 非線形メカニカルシステムのロバストモデル追従制御、計測自動制御学会論文集、Vol.24, No.2, 126/133(1988)
- [11] 杉江、大須賀、小野: 二重構造ロバストモデル追従制御、計測自動制御学会論文集、Vol.24, No.4, 350/356(1988)
- [12] 大須賀、杉江、小野: マニピュレータのPD型二重構造ロバストモデル追従制御、計測自動制御学会論文集、Vol.25, No.1, 46/53(1989)
- [13] R.Horowitz, H.I.Stephens and G.Leitmann: Experimental Implementation of a Deterministic Controller for a D.C.Motor with Uncertain Dynamics, Trans. ASME, J.DSMC, Vol.111, No.6, 244/252(1989)
- [14] F.Garofalo and G.Leitmann: Guaranteeing Ultimate Boundedness and Exponential Rate of Convergence for a Class of Nominally Linear Uncertain Systems, Trans. ASME, J.DSMC, Vol.111, No.12, 584/588(1989)
- [15] C.G.Kang, G.Leitmann and R.Horowitz: Robust Deterministic Controller Design of a Two Degree of Freedom SCARA Manipulator, Proc. American Control Conference, Pittsburgh, TP2, 1457/1462(1989)
- [16] 吉川、井村、村井: ロボットマニピュレータのロバストな軌道追従制御、システム制御情報学会誌、Vol.3, No.7, 218/225(1990)

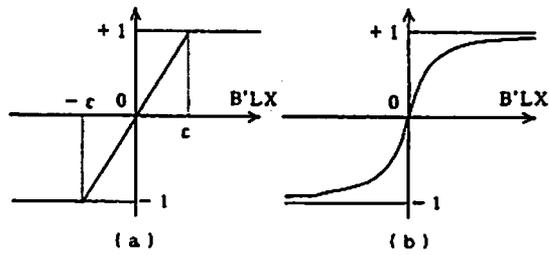


Fig. 1 Two ideas for continuousable

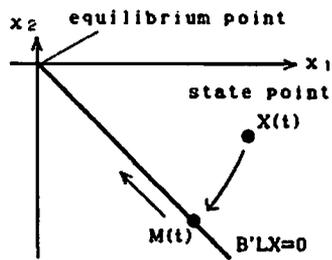


Fig. 2 Moving Attractor

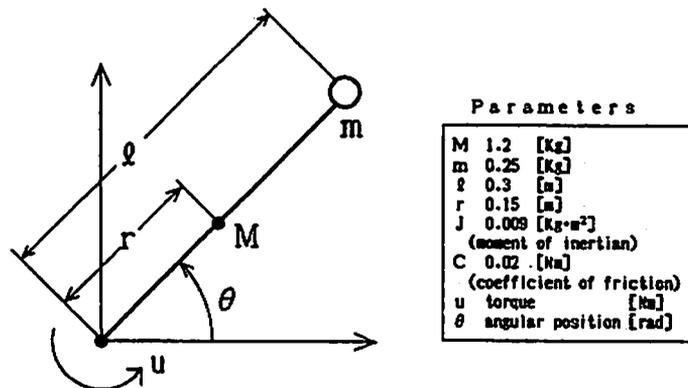


Fig. 3 Model of a single link robotic arm

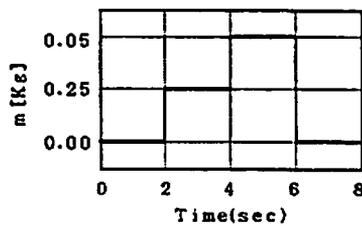
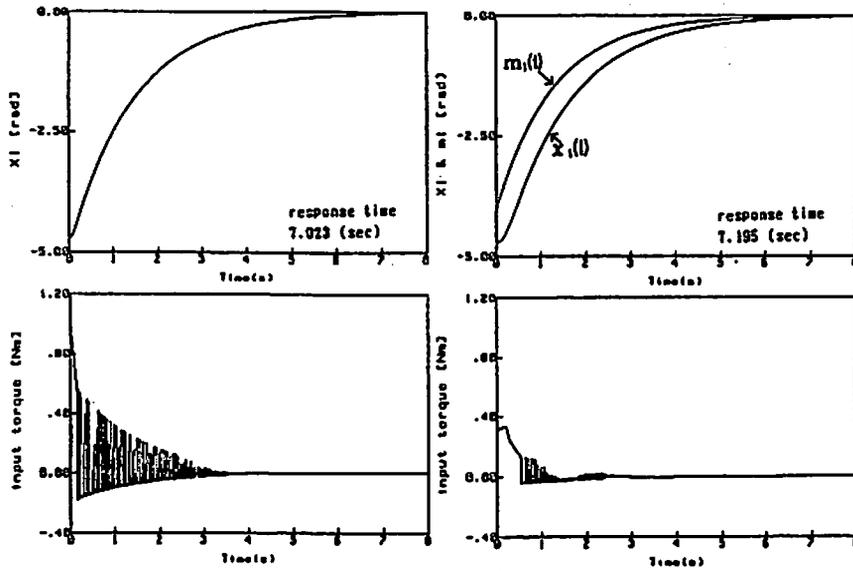
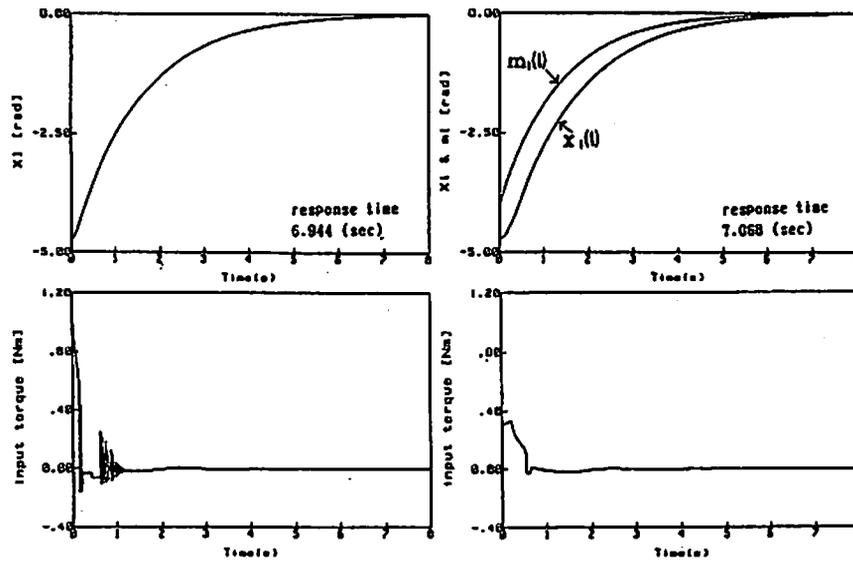


Fig. 4 Load history



(a) Responses due to G. Leitmann and others

(b) Responses of authors' control law with Moving Attractor



(c) Responses due to G. Ambrosino and others

(d) Responses of authors' control law with Moving Attractor

Fig. 5 Results of simulation