

不確かさを含むシステムの仮想目標値による ロバスト制御

坂本, 憲昭 / SAKAMOTO, Noriaki

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

68

(発行年 / Year)

1993-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第30号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

1993-03-24

(学位名 / Degree Name)

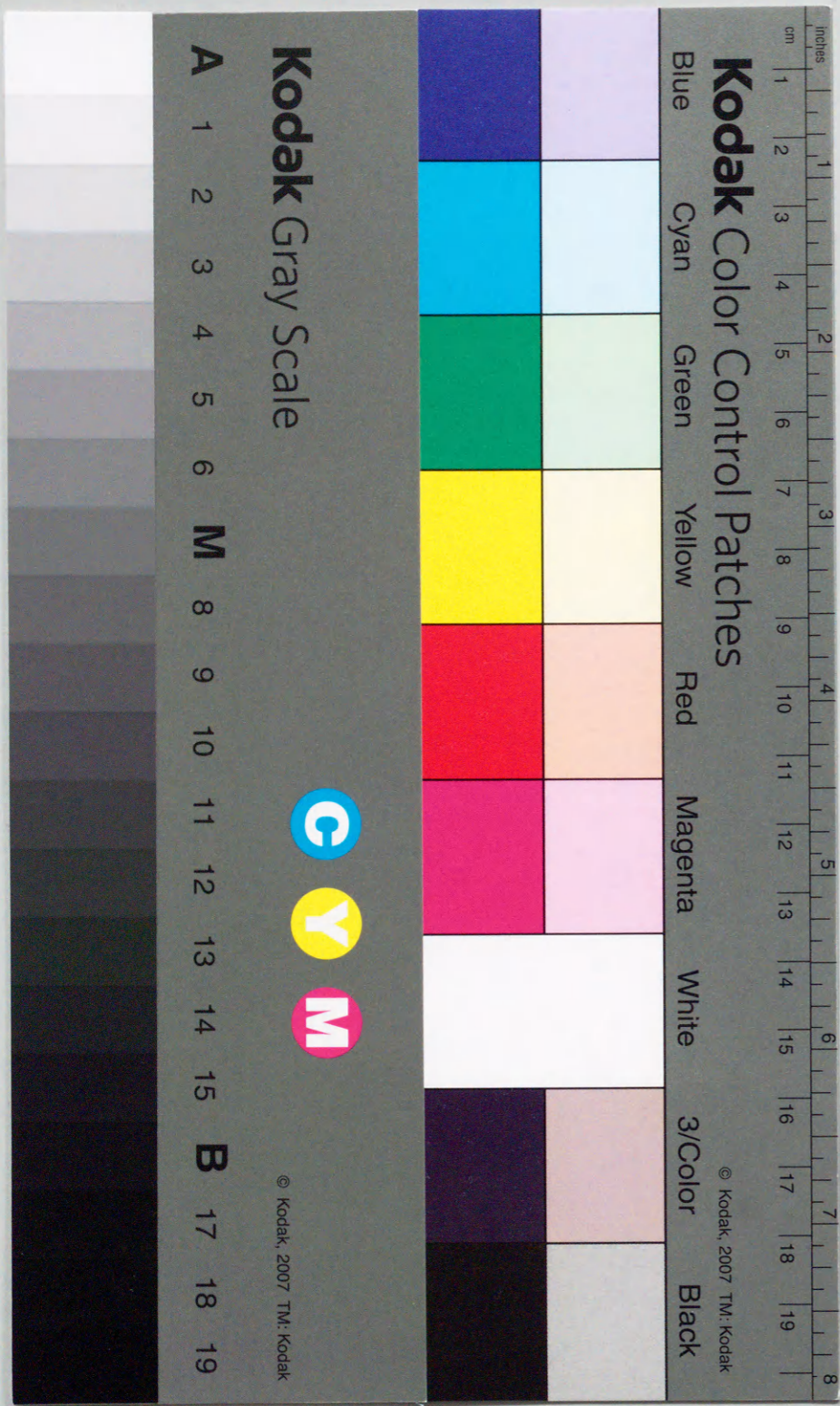
博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.11501/3067496>



不確かさを含むシステムの
仮想目標値によるロバスト制御

法政大学 大学院 工学研究科
システム工学専攻 博士後期課程

坂本 憲昭

①

不確かさを含むシステムの
仮想目標値によるロバスト制御

法政大学 大学院 工学研究科

システム工学専攻 博士後期課程

増淵 研究室

坂本 憲昭

論文概要

実在システムにおいて、所要の動的特性や定常特性などが得られるように制御系を設計するためには、まず、その数学モデルを求め、そのモデルから設計を行う。ところが、実在システムを完全に記述した数学モデルを求めることは難しく、例えば、制御対象が不確かな変動を含む場合がある。そこで最近では、不確かさに打ち勝つためのロバスト (robust, 頑健な, 丈夫な) な制御則がいくつか提案されている。そのなかでも G. Leitmann らによる制御則と可変構造制御則が有望である。

ところが、両制御則において重要な問題がある。これらの制御則は、状態空間内にあらかじめ切り換え面を与え、不確かさを考慮して切り換え操作量を求める。実行においては、制御対象の状態の切り換え面に対する位置に応じて操作量を切り換え、その状態を切り換え面に拘束する。その際に、様々な原因により操作量を切り換えるのが遅れ、操作量がチャタリングと呼ばれる激しい振動を起こすことがほとんどである。チャタリングは操作部に負担をかけて破損させるとか、考慮外のシステムの特性と共振を起こす可能性があるため、解決すべき重要な問題である。しかしながら、従来のチャタリングを低減するための研究は、いずれも制御対象を限定したり、構成が複雑、応答が劣化するなどの問題がある。

そこで、本論文では、チャタリングを低減するために仮想目標値の構想を提案する。その原理は、仮想的目標値を切り換え面上にて、制御対象の状態に近い位置に設置し、状態が真の目標値まで移動する応答速度よりも、やや速い速度で真の目標値まで切り換え面上をアルゴリズムにより動かす。その時に、真の目標値からではなく、状態の近くにある仮想目標値からの偏差を用いて操作量を求めることにより、切り換える操作量を低減化させ、その結果、チャタリングが低減するものである。仮想目標値は、操作部にそのアルゴリズムを組み込むだけで簡単に実現することができる。

仮想目標値を G. Leitmann らによる制御則および可変構造制御則に適用し、それぞれ、制御対象の一樣終局有界性、漸近安定性を保証することを示す。1 および 2 リンクマニピュレータの定値および追従制御問題を考え、仮想目標値を適用した制御則が、従来の制御則による応答と比較して著しいチャタリングの低減を実現することを示す。また、あるバッチプロセスの温度パターン追従制御問題に対して仮想目標値の概念を適用した可変構造制御則を構成し、従来の P I 制御則や可変構造制御則では達成できなかった良好な応答が得られることを示す。

いくつかの例題は、仮想目標値が簡単に実現できることと、著しいチャタリング低減化の効果を持つことを示している。さらに、アルゴリズムを多少変更することにより、様々な制御対象や制御則、制御問題に適用できることを示している。

目次

目次

- 1 序論 5
 - 1.1 不確かさを含むシステム 5
 - 1.2 不確かさを含むシステムのための制御則 10
 - 1.3 Leitmann らによる制御則について 13
 - 1.4 可変構造制御則 (VSC) について 15
 - 1.5 上記制御則の問題点 19
 - 1.6 チャタリングを低減するための従来の研究と問題点 20
 - 1.7 本研究の目的と構成 23
- 2 仮想目標値による不確かさを含む線形システムの制御 26
 - 2.1 はじめに 26
 - 2.2 不確かさを含む線形システムの制御 27
 - 2.2.1 対象とする線形不確定動的システム 27
 - 2.2.2 従来の制御則について 28
 - 2.2.3 従来の制御則が保証する安定性 30
 - 2.3 仮想目標値の導入 32
 - 2.4 仮想目標値を適用した制御則の安定性 33
 - 2.5 例題 35
 - 2.5.1 制御対象 35
 - 2.5.2 制御則の決定 36
 - 2.5.3 仮想目標値の適用 37
 - 2.5.4 シミュレーション結果 37
 - 2.5.5 追従制御の場合 38
 - 2.6 まとめ 38

3 可変構造制御則における仮想目標値の役割	41
3.1 はじめに	41
3.2 Leitmann らによる制御則と可変構造制御則の類似点と相違点	42
3.3 新しい仮想目標値のアルゴリズム	45
3.3.1 制御対象と Leitmann らによる制御則	45
3.3.2 切り換え面について	46
3.3.3 仮想目標値の新しいアルゴリズム	46
3.3.4 切り換え操作量の導出	49
3.3.5 安定性について	49
3.3.6 例題	52
3.4 不確定システムに対する可変構造制御則への適用	53
3.5 まとめ	54
4 不確かさを含むマニピュレータの仮想目標値によるロバスト制御	55
4.1 はじめに	55
4.2 2リンクマニピュレータ	56
4.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則	58
4.4 シミュレーション結果	63
4.4.1 定値制御の場合	63
4.4.2 追従制御の場合	64
4.5 まとめ	65
5 仮想目標値によるバッチ反応プロセスの温度追従制御	70
5.1 はじめに	70
5.2 バッチ反応プロセスと従来の制御	71
5.2.1 プロセスのモデルと制御目的	71
5.2.2 従来のPI制御による応答	73
5.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則による制御	73
5.3.1 従来の可変構造制御則について	73
5.3.2 仮想目標値とその移動	75
5.3.3 制御則の導出	76
5.3.4 シミュレーション結果	78
5.4 ロバスト性の検討	79
5.5 まとめ	79

6 アナログ計算機による操作量のチャタリングの検討	84
6.1 はじめに	84
6.2 シミュレーションのための例題	87
6.3 デジタル計算機によるシミュレーション結果	88
6.4 アナログ計算機によるシミュレーション結果	89
6.5 考察	89
6.6 まとめ	90
7 結論	96
謝辞	98
文献	100
発表論文	125

第 1 章

序論

1.1 不確かさを含むシステム

実在するシステムを制御するために、制御対象の応答を見ながら制御則のパラメータを調整していく経験的な手法や、人手に頼っている操作を何らかの数式に置き換えて自動化する手法とは異なり、理論に基づいて制御則を求めるとすれば、まず、その数学モデルを求める必要がある。そして、そのモデルは非線形であったり時変形であることが多いが、一般には適宜に線形化を行い、これまでに展開されている多くの線形理論によって、可制御性、可観測性を検討し、極配置則を求めたりするなどの手法を用いてフィードバック制御系を構成することができる。すなわち、所要の動的特性、あるいは定常特性を満足する制御系を設計することができる。

ところが、実在システムにおいて、このようにして求めた特性の制御則を用いても、所要の制御効果を得られない場合が多い。その主な原因は制御系設計を行うための基本となる数学モデルが忠実に実在システムの特性を表現していないことにある。

数学モデルの不完全さの要因について考えてみると、第 1 にモデリングの難しさがある。例えば、

- 制御対象に関する知識不足
- 数式に表わせない特性、把握できない物性や環境の変動
- アクチュエータの飽和などによって加わる非線形性
- 外乱やノイズの性質が不明

などによって、実在システムを完全に記述できる場合が非常に少ないことである。

第 2 の要因は、制御対象が不確かな変動量をもつ場合があることによる。例えば、

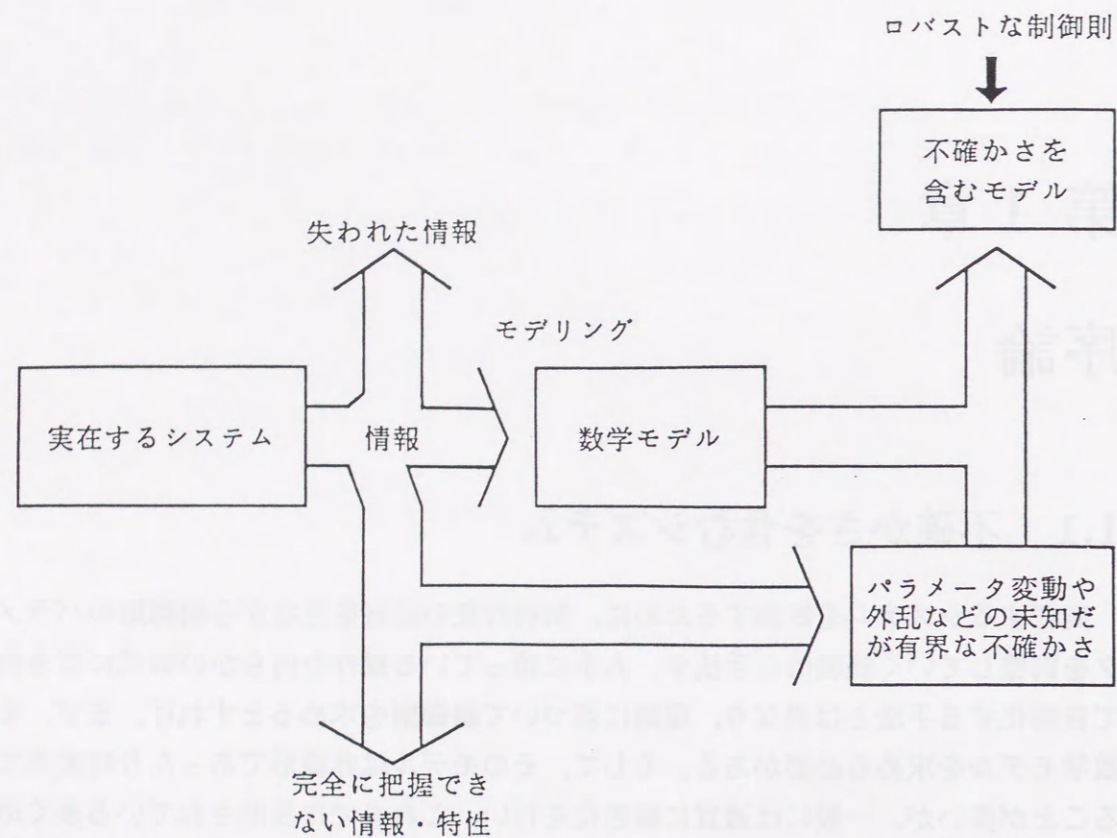


Fig.1.1 Real system and mathematical model.

- パラメータが動作中に不規則に変動する
- 動作点や負荷を変更すれば、それに対応して制御対象の時定数やパラメータが変動する

ことなどが挙げられる。

したがって、簡略化されたモデルによる実在システムの記述や、モデルのパラメータがある幅をもって変動し、ある範囲に真の値がある、などの不確かさは避けられないといえる。(Fig.1.1 参照)

それでは具体的にいくつかの例をとり、不確かさにはどんなものがあるかを述べる。

(1) 簡単な2重水槽型熱交換装置の場合

Fig.1.2 の簡単な熱交換装置を考える。この装置は、動作点近傍において線形化を行

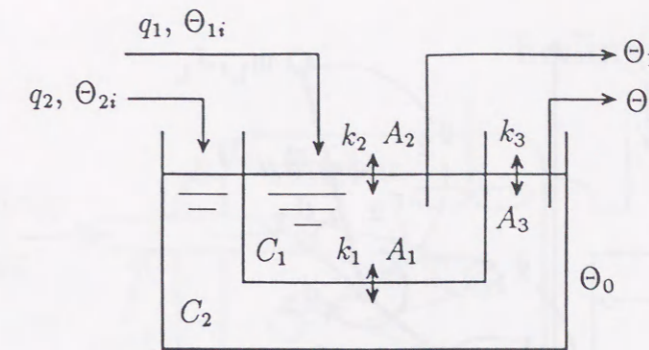


Fig.1.2 Thermal system.

うと、次の2次システムにより表わされる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\Theta}_1 \\ \dot{\Theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{k_1 A_1}{C_1} + \frac{k_2 A_2}{C_1}\right) & \frac{k_1 A_1}{C_1} \\ \frac{k_1 A_1}{C_2} & -\left(\frac{k_1 A_1}{C_2} + \frac{k_3 A_3}{C_2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Theta_{1i} - \Theta_{1s}}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} q_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Theta_{2i} - \Theta_{2s}}{C_2} \end{bmatrix} q_2 + \begin{bmatrix} \frac{k_2 A_2}{C_1} \\ \frac{k_3 A_3}{C_2} \end{bmatrix} \Theta_0 \quad (1.1)$$

ただし、内部水槽と外部水槽において C_1, C_2 は熱容量で、 Θ_1, Θ_2 は温度変化、 k_1 は両流体間の熱通過率、 k_2, k_3 は熱伝達率、 A_1, A_2, A_3 は熱通過面積である。両水槽に流入する流体流量と温度をそれぞれ $q_1, \Theta_{1i}, q_2, \Theta_{2i}$ とし、動作点を表わす状態を Θ_{1s}, Θ_{2s} とする。 Θ_0 は外部の温度である。

このシステムにおいて、流体の攪拌が不十分なために起こる熱通過率 k_1 の変動、風などの環境の変化による熱伝達率 k_2, k_3 の変動がある。さらには、流入流体の流量 q_1, q_2 や熱容量 C_1, C_2 などの変動が起こることもある。したがって、熱通過面積を除くほとんどのパラメータが変動する可能性がある。

(2) ロボットマニピュレータの場合

Fig.1.3 は水平面を回転する2リンクマニピュレータを示す。このモデルの運動方程式は次のように表わされる。

$$[M + \Delta M(\Theta)] \ddot{\Theta} + B(\Theta, \dot{\Theta}) + D\dot{\Theta} = U \quad (1.2)$$

ここで、状態量 $\Theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, 操作量 $U = [u_1, u_2]^T$,

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad \Delta M(\Theta) = \begin{bmatrix} \Delta m_{11} & \Delta m_{12} \\ \Delta m_{21} & \Delta m_{22} \end{bmatrix},$$

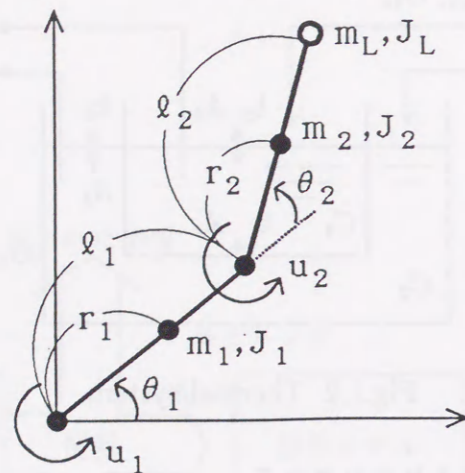


Fig.1.3 Manipulator model.

$$B(\Theta, \dot{\Theta}) = [b_1, b_2]^T, \quad D = \text{diag}[d_1, d_2],$$

$$m_{11} = J_1 + J_2 + m_1 r_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 r_2^2$$

$$m_{12} = J_2 + m_2 r_2^2, \quad m_{21} = m_{12}, \quad m_{22} = J_2 + m_2 r_2^2$$

$$\Delta m_{11} = 2m_2 l_1 r_2 \cos \theta_2 + J_L + m_L (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2)$$

$$\Delta m_{12} = m_2 l_1 r_2 \cos \theta_2 + J_L + m_L (l_2^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2)$$

$$\Delta m_{21} = \Delta m_{12}, \quad \Delta m_{22} = J_L + m_L l_2^2$$

$$b_1 = -(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 - 2(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$b_2 = (m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2$$

$[M + \Delta M]$ は慣性行列, ΔM は負荷変動と非線形な関数をもつパラメータをまとめたものである。 B は遠心力, コリオリ力を表わし, D は粘性摩擦係数行列である。

添え字を省略するが, J はリンクの慣性モーメント, m, l はそれぞれリンクの質量と長さ, r は関節からリンクの重心までの距離, m_L は負荷質量, J_L はその慣性モーメントである。

このシステムでは次のような不確かさが考えられる。このロボットの作業対象がいつも同じ負荷であればよいが, 必要に応じて様々な負荷を想定すると, m_L の値が変わり, 多くのパラメータが変動する。また, 摩擦係数 d_1, d_2 は非線形な特性をもって変動するので, その把握が難しい。アームの剛性の乏しい部分およびハーモニックドライブなどから高周波の動特性が発生することがある。

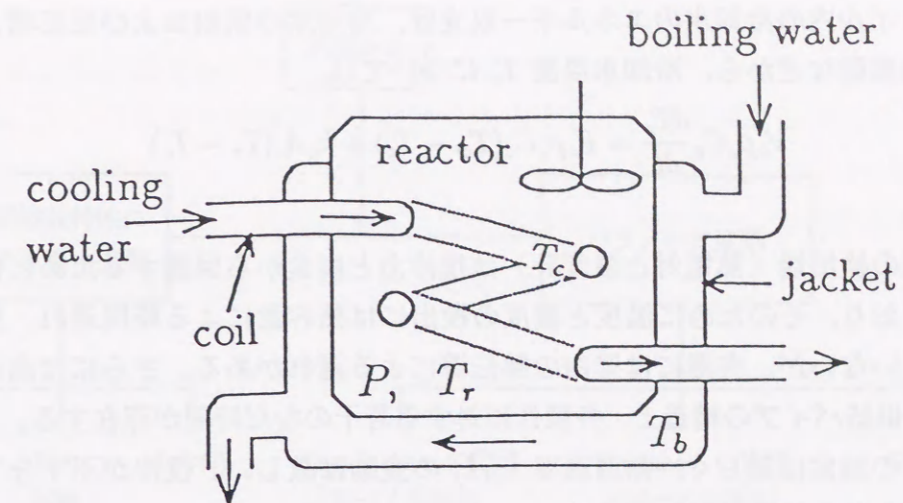


Fig.1.4 Batch reactor process.

(3) ある化学反応プロセスの場合

Fig.1.4 の化学反応プロセスはバッチ式で, 完全混合形, 発熱反応プロセスであるとする。このプロセスは, ジャケットに高温加熱水 (温度 T_b , 流量 F_b), 反応槽内のコイルに冷却水 (温度 T_c , 流量 F_c) を供給し, それぞれの流量を調節することで反応槽温度 $T_r(t)$ を調節する。

反応槽内は高速に攪拌されているので集中系と見なすことができるとする。この動特性モデルを以下に示す。(パラメータの意味は, 第5章 Table.5.1 参照)

反応槽内の濃度 P の収支は,

$$\frac{dP}{dt} = -kP^3, \quad k = k_\infty \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right)$$

となる。反応槽内から冷却水への熱移動と高温加熱水から反応槽内への熱移動を考えて, 反応槽内のエネルギー収支は, 反応槽温度 $T_r(t)$ について反応熱と反応速度式から

$$V_r \rho_r C_r \frac{dT_r}{dt} = QV_r k P^3 + k_j A_j (T_b - T_r) - k_c A_c (T_r - T_c)$$

となる。ジャケット内の高温加熱水のエネルギー収支は, 高温加熱水の供給, およびジャケット内より反応槽への熱移動などから, 高温加熱水温度 T_b については

$$V_j \rho_b C_b \frac{dT_b}{dt} = F_b \rho_b C_b (T_{bi} - T_b) - k_j A_j (T_b - T_r)$$

となる。コイル内の冷却水のエネルギー収支は、冷却水の供給および反応槽よりコイル内への熱移動などから、冷却水温度 T_c については

$$V_c \rho_c C_c \frac{dT_c}{dt} = F_c \rho_c C_c (T_{ci} - T_c) + k_c A_c (T_r - T_c)$$

となる。

反応槽内の検出端（熱電対と濃度計）は攪拌力と腐食から保護するために保護管に入れられており、そのために温度と濃度の検出には熱容量による時間遅れ、壁の厚さを考慮していないが、実際には壁内の熱伝導による遅れがある。さらには高温加熱水と冷却水の供給パイプの構造上、弁操作に対する若干のむだ時間が存在する。また、頻度因子 k_∞ の測定は難しく、熱通過率 k_c, k_j の変動は激しい。攪拌が不十分であると高次の不確かな動的変動が存在する。

以上三つの例を示したが、これらの不確かさを考慮せずに制御系を設計した場合には、不確かさによって実在システムと制御則の特性が一致せずにシステムの特性が悪化したり、安定性が乏しくなったりすることになる。

したがって、制御則が実在システムの特性と一致するためには不確かさを無視したモデルに基づく制御則ではなく、不確かさをもつモデルに基づいて設計を行い、その不確かさに打ち勝つロバスト (robust: 頑健な, 丈夫な) な制御則を考慮しなければならない。

最近では、このような要求に対し、不確かさを含むシステムを制御対象とするロバストな制御則がいくつか提案されている。次節において、それらのいくつかを説明する。以下、不確かな要素のあるシステムを不確定システムと呼ぶことにする。

1.2 不確かさを含むシステムのための制御則

前節ではシステムに含まれる不確かさの例を説明し、ロバストな制御則の必要性を述べた。この要求に対して数多くの制御則が提案されているが、不確かさの表現により大きく二つに分けることができる。(Fig.1.5 参照)

第1はシステムの内部特性などには立ち入らず、単に入出力特性、特に周波数特性の変動の大きさの限界のみを考える、いわば周波数特性により表わす不確かさを扱う

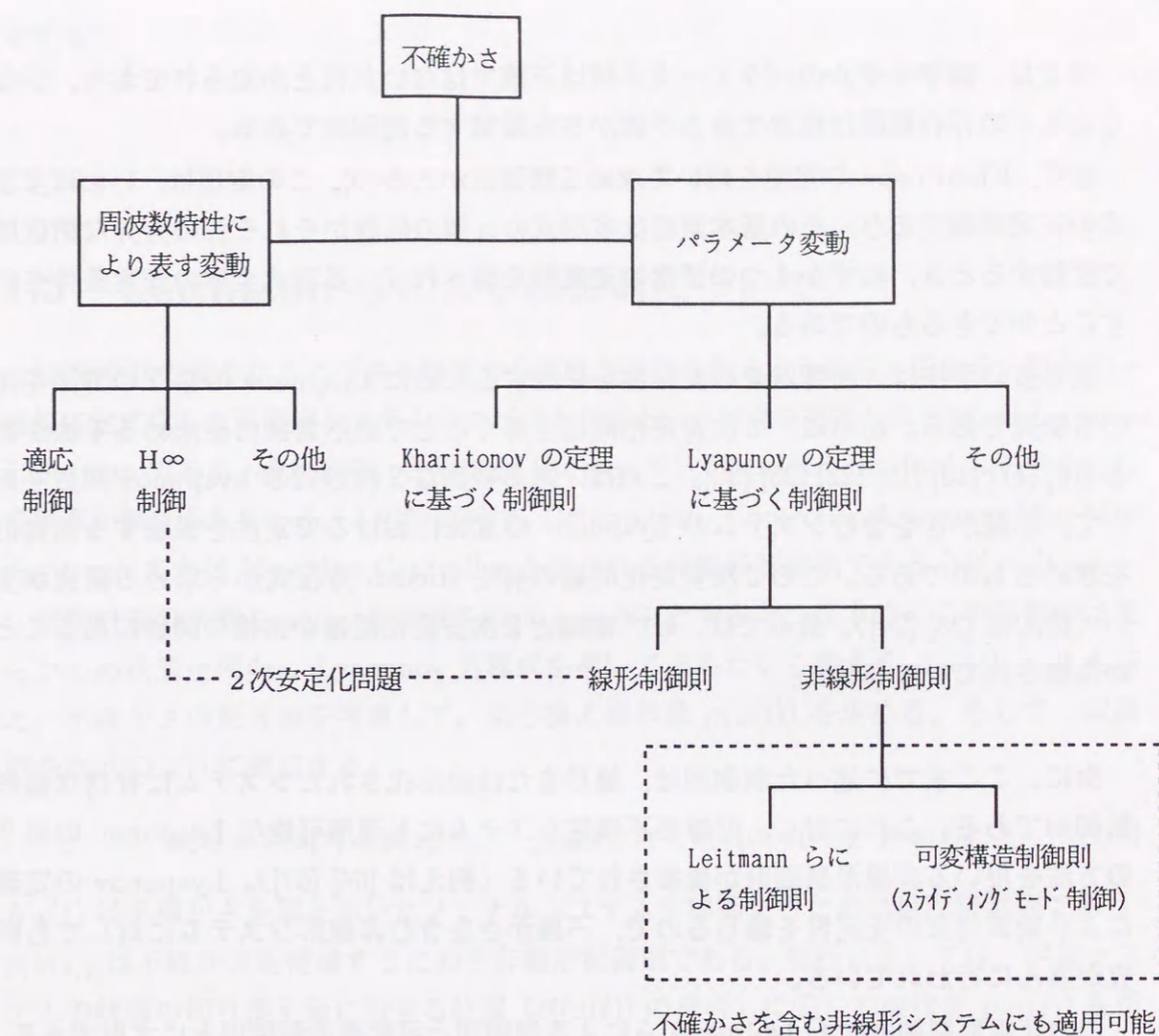


Fig.1.5 Robust control strategies for linear systems with uncertainties.

ものである。早い時期から提案されている手法として適応制御がある。(例えば [13]) システムの不確かさに対して制御則のパラメータを調整するものである。

最近では、 H^∞ 制御理論の研究が盛んに行われている (例えば [5])。この制御則の特徴は線形制御則であり、制御特性の評価を不確かさの最大の変動を含む周波数特性において行う。設計目標は、ロバスト安定性、応答特性、感度特性であり、設計した要求を満足する補償器 (線形フィードバックゲイン) を2つの Riccati 方程式を解くことにより求める。以前は補償器の計算が複雑であるといわれていたが、最近では計算機による支援システムが市販されている (MATLAB や MATRIX_x など)。また、企業でも関心が高く実在システムへの適用例が多く報告されている。

第2は、数学モデルのパラメータの値は正確ではないが何とか知られており、少なくともその存在範囲は推定できる不確かさを補償する制御則である。

まず、Kharitonov の定理を用いて求める制御則がある [9]。この定理は、いわば多項式の安定理論であり、その基本原理は多項式の n 個の係数がそれぞれの有界な閉区間で変動するとき、わずか4つの要素の安定性を調べれば、多項式全体の安定条件を示すことができるものである。

最も多い手法は、制御対象の安定性を保証するために Lyapunov の第2の方法を用いる研究である。初めに、2次安定化問題を解くことで線形制御則を求める手法がある [16] [17] [18] [19] [22] [25] [32]。これは、ある特別な2次形式の Lyapunov 関数を用いて、不確かさを含むシステムの Lyapunov の意味における安定性を保証する制御則を求めるものである。この2次安定化問題の解を Riccati 方程式から求める研究が多い (例えば [23] [24])。最近では、 H^∞ 制御と2次安定化問題が密接な関係にあることが指摘されている [36]。

次に、ここまでに述べた制御則は、線形または線形化されたシステムに有効な線形制御則である。これに対し、非線形不確定システムにも適用可能な Lyapunov の第2の方法を用いる非線形制御則が提案されている (例えば [66] [67])。Lyapunov の定理により制御対象の安定性を論じるので、不確かさを含む非線形システムに対しても研究が盛んに行われている。

この非線形制御則は G.Leitmann らによる制御則と可変構造制御則とに大別できる。本論文ではこれらの制御則に着目し、研究対象としている。その主な理由は、不確かさに対してロバスト性が強く、構成が比較的容易で実現しやすい。それ故、現場で実際に使えるロバストな制御則として期待できるからである。

ところが、Leitmann らによる制御則と可変構造制御則をそれぞれ実際のシステムに適用する場合、解決すべき共通かつ重要な問題点がある。次節においてこれらの制御則を説明し、その後その問題点を述べる。

最近では上記の研究の他に、不確かさを含む非線形システムに対して状態空間線形化によるアプローチが行われている [63] [64] [65]。さらに、非線形システムのための H^∞ 制御が研究されるようになった。この他にもいくつか新しい手法が提案されているが、本論文の手法には関係が少ないので、詳しくは文献 [2] [3] [7] [6] [9] [10] [14] に

ゆずる。

1.3 Leitmann らによる制御則について

1970年代の後半からロバスト制御の必要性が指摘されるようになってから、初めて一般的に定式化した不確定システムのロバスト制御という研究を提案したのが、G.Leitmann, S.Gutman である。それ以後、さらに M.Corless, Y.H.Chen, H.L.Stalford らを中心として研究が続けられている。この制御則は、Deterministic Controller, Lyapunov Min-Max Approach または Min-Max Controller と称される非線形制御則である [69] ~ [124]。

制御対象の状態を $x(t)$ 、目標値を原点 $x = \{0\}$ とすると、基本的にこの制御則はあらかじめ状態空間内に Lyapunov 方程式を解いて求めた切り換え面 $\sigma(x(t)) = 0$ を与え、不確かさの最大値を考慮して、切り換え操作量 $\rho(x(t))$ を求める。そして、制御則を次式のように構成する。

$$u(t) = Kx(t) + p(x(t)), \quad p(x(t)) = -\text{sgn}(\sigma(x(t))) \cdot \rho(x(t)) \quad (1.3)$$

$Kx(t)$ は不確かさを零とおいたノミナルシステムを制御するための線形制御則であり、 $p(x(t))$ は不確かさを補償するための非線形制御則である。実行においては、対象システムの状態の切り換え面に対する位置 ($\sigma(x(t))$ の符号) に応じて操作量 $\rho(x(t))$ を切り換えるものである。この制御則を適用した場合のブロック線図を Fig.1.6 に示す。

この制御則は、Lyapunov の第2の方法を用いるもので非線形システムにも適用することができる。また、不確かさの統計的、関数的特性などの情報は必要とせず、単

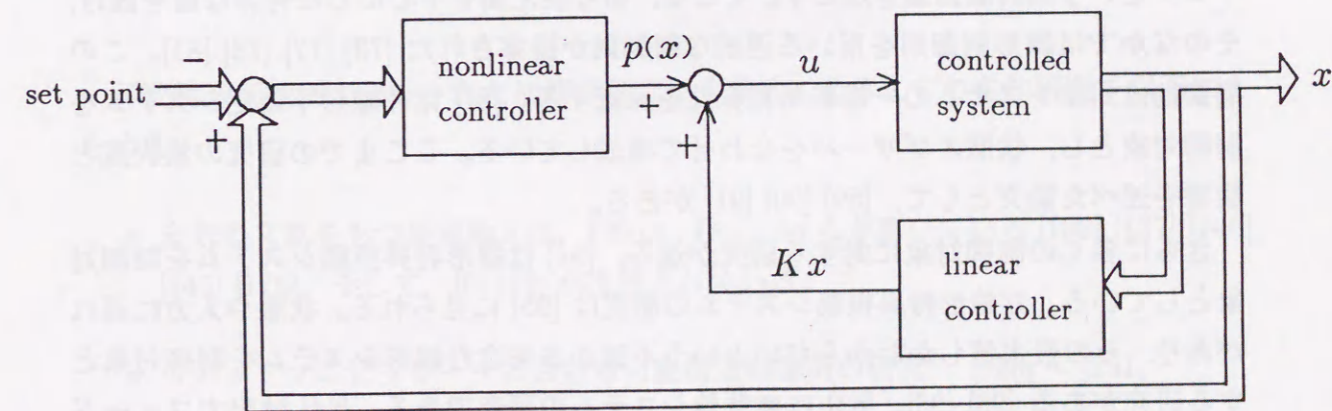


Fig.1.6 Block diagram of the closed-loop system with the control strategy.

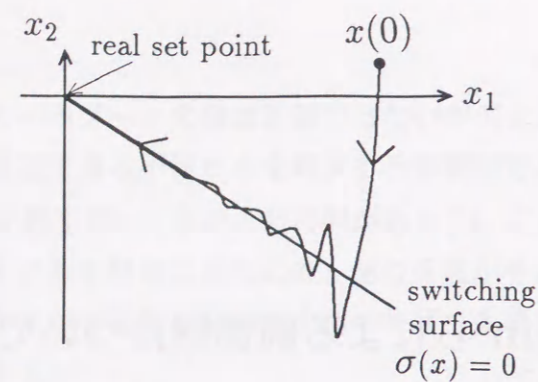


Fig.1.7 Typical closed-loop system trajectories for G. Leitmann and others.

に有界であればよいという特色がある。この制御則をある2次システムに適用したときの応答の一例を Fig.1.7 に示す。

この研究の発端は、不確かな右辺をもつ微分方程式の解の存在に関する研究をもとに、H.L.Stalford, S.Gutman と G.Leitmann が微分ゲームの解を求める手法を研究 [69] [70] し、その手法をさらに不確かさを含むシステムの安定性を保証する理論 [71] へと発展させたものである。

初期に提案された研究から最近に至るまでの主な研究を以下に述べる。

初めに、この研究は線形不確定システムを制御対象とし、制御則に不連続関数を用いることで対象システムの一様漸近安定性を保証するものであった [71] [73] [74] [75]。

非線形不確定システムを制御対象とする研究は、[72] [85] [89] に見られる。同時期に次節において可変構造制御則との類似点が指摘されている [76] [79]。

制御則に不連続関数 (sgn 関数) を用いると操作量が不連続になるために、チャタリングという高周波振動を起す。そこで、切り換え面を中心にした有界な層を設け、そのなかでは線形制御則を用いる連続な制御則が提案された [73] [77] [78] [81]。この制御則は対象システムの一様終局有界性を保証する。[87] は非線形不確定システムを制御対象とし、状態オブザーバを合わせて構成している。ここまでの研究の集大成と展望を述べた論文として、[89] [90] [91] がある。

さらに多くの制御対象に対する研究が進み、[91] は線形特異摂動システムを制御対象としている。非線形特異摂動システムの研究は [95] に見られる。状態や入力に遅れがあり、その最大値しかわからないという不確かさを含む線形システムを制御対象とする研究がある [96] [98]。[83] は離散値システムの研究である。[84] は出力フィードバックの提案であり、例題として磁気浮上システムを取り上げている。また、多入力

系の線形時変不確定システムの研究は [97] にあり、線形結合された不確定システムの制御についての研究が [99] [104] にある。[93] [100] は不確かさを含む線形、非線形システムにおいて状態が目標値に到達するまでの収束速度を任意に与えて、それを保証する研究である。ロボットの様々な制御問題のための研究は非常に多い [105] ~ [124]。

ここまでの Leitmann らによる制御則は、許容する不確かさの最大値を既知とする条件が必要であったが、Y.H.Chen を中心として不確かさの最大値を実時間で推測する適応ロバスト制御と呼ばれる手法が提案されている [110] [66] [102] [207]。

このように Leitmann らによる制御則は、現在もなお一連の研究者たちが多くの制御対象や制御問題についての理論的研究を行っている。今後は力学系以外の実在システムへの適用に研究が展開するものと考えられる。

1.4 可変構造制御則 (V S C) について

この節では、不確かさを含むシステムに対する第2の有効な非線形制御則である可変構造制御則 (Variable Structure Control; VSC, またはスライディングモード制御則; Sliding Mode Control) を説明する。可変構造制御則は、1960年代後半に Emelyanov, Utkin, Itkis らの旧ソビエト連邦の研究者たちにより提案された。1977年に V.I.Utkin の展望論文 [140] が米国電気電子学会 IEEE に掲載されて反響を呼び、それ以来多くの研究者たちがこの手法の研究に携わっている。この背景には、制御則を実現するために必要な高速演算およびスイッチングが実用化になったことと、原理が非常にわかりやすく、非線形時変な制御対象にも適用可能であることがあげられる。

可変構造制御則が提案された初期の研究から最近に至るまでの主な研究を以下にまとめる。

- 多数の文献をもつ展望論文は、Utkin, DeCarlo らが書いている [136] [137] [140] [145] [176]。そして、[6] [12] が出版されている。
- ロボットマニピュレータにおける可変構造制御則の研究 [226] ~ [251]
- スライディングオブザーバの研究 [163] [184] [196] [212] [214]

- 入出力線形化手法または状態空間線形化手法に基づいて可変構造制御則を構成する研究 [178] [188] [193] [221]
- 離散値システムを制御対象とする研究 [151] [156] [170] [185] [215] [225]
- 参照または理想モデル追従制御問題の研究 [139] [141] [149] [161] [191] [222]
- マニピュレータ以外の力学系の研究 [152] [171] [203] [205] [211]
- 線形不確定システムを制御対象とする研究 [143] [144] [150] [153] [155] [180] [192] [202] [225]
- 非線形不確定システムを制御対象とする研究 [146] [181] [188] [193] [200] [210] [221]
- 特異摂動モデルを制御対象とする研究 [157]
- 積分器をもつ可変構造制御則の研究 [175] [179] [198] [204]
- 出力フィードバックの研究 [195] [209] [220]

可変構造制御則の基本的特徴は、あらかじめ状態空間内にシステムパラメータに依存しない切り換え面を与え、対象システムの状態をその切り換え面に拘束するための非線形制御則である（応答の一例を Fig.1.7 に示す）。その切り換え面上に拘束されたシステムの応答は、システムのパラメータが変動したり、外乱が加わるなどの不確かさに対して不感というロバスト性をもっている [135]。また、切り換え面に拘束された対象システムの状態が漸近安定になるように、その面を与えるので、拘束された状態は所要の応答によって切り換え面上を目標値まで滑っていく。対象システムの状態が切り換え面に吸収そして拘束される現象を、スライディングモード (Sliding Mode) といい、拘束された状態はスライディングモード方程式と呼ばれる式によって記述することができる。すなわち、このスライディングモード方程式の応答が目標値に対して所要の応答を描くように切り換え面を設計すればよい。切り換え面の設計方法の研究としては、例えば [148] [159] [164] [216] がある。

ここでは、簡単に次の線形時不変な制御対象を取り上げて可変構造制御則を説明する。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.4)$$

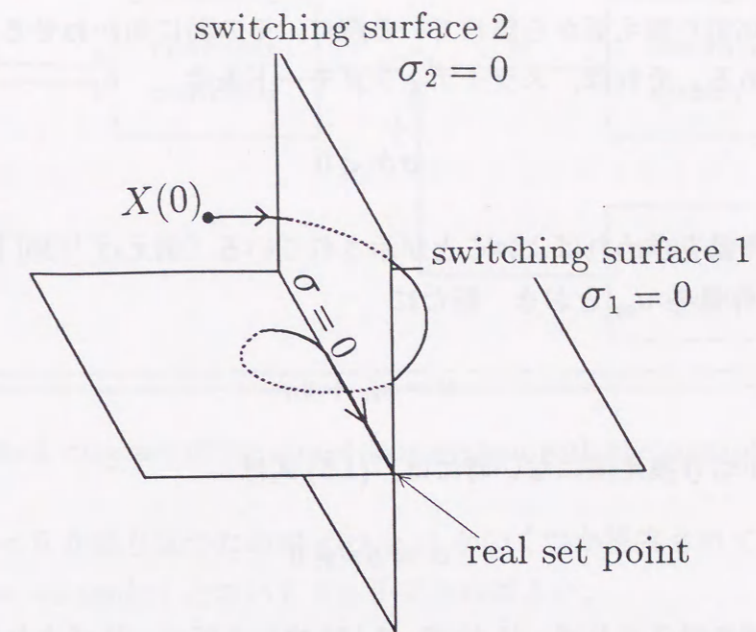


Fig.1.8 Typical closed-loop system trajectories for VSC.

切り換え面を

$$\sigma = Sx = 0 \quad (1.5)$$

とする。ただし、 S は定数行列である。(1.5) 式を微分すると

$$\dot{\sigma} = S\dot{x} = 0 \quad (1.6)$$

を得る。(1.4) 式を (1.6) 式に代入すると

$$\dot{\sigma} = S\dot{x} = S[Ax + Bu] = 0 \quad (1.7)$$

を得る。ここで SB が正則になるように S を与えれば、 u について解くことができる。

$$u = -(SB)^{-1}SAx \quad (1.8)$$

この操作量は等価操作量と呼ばれる。この操作量 (1.8) 式を (1.4) 式に代入すれば

$$\dot{x} = [I - B(SB)^{-1}S]Ax \quad (1.9)$$

を得る。この式が対象システムの状態が切り換え面に拘束されている時の応答を表し、スライディングモード方程式と呼ばれる。ここに求めた操作量 u は、状態が切り換え面上にあるという前提のもとに (1.5) 式、(1.6) 式が成り立つので求めることができる。

次に、状態が切り換え面から離れている時に、その面に向かわせるための操作量を求める必要がある。それは、スライディングモード条件

$$\sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (1.10)$$

が成り立つ操作量を求めればよいことが示されている（例えば [136] [137] [140]）。

(1.8) 式の操作量を u_{eq} とおき、新たに

$$u = u_{eq} + u_N \quad (1.11)$$

とおく。状態が切り換え面にはない時には、(1.5) 式は

$$\sigma = Sx \neq 0 \quad (1.12)$$

である。この式を微分すれば、(1.4) 式、(1.11) 式および (1.12) 式より

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= S\dot{x} \\ &= S[Ax + Bu] \\ &= SAx + SB(u_{eq} + u_N) \\ &= SAx + SBu_{eq} + SBu_N \end{aligned} \quad (1.13)$$

を得る。(1.7) 式より $SAx + SBu_{eq} = 0$ が成り立つから、上式は次のようになる。

$$\dot{\sigma} = S\dot{x} = SBu_N \quad (1.14)$$

この式を u_N について解くと、 SB が正則であると仮定して

$$u_N = (SB)^{-1} S\dot{\sigma} \quad (1.15)$$

を得る。次にスライディングモード条件 (1.10) 式に、(1.14) 式および (1.15) 式を代入すれば

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma \cdot SBu_N \\ &= \sigma \cdot S\dot{\sigma} \end{aligned} \quad (1.16)$$

となる。ここで

$$S\dot{\sigma} \triangleq f(\sigma, x, t) \quad (1.17)$$

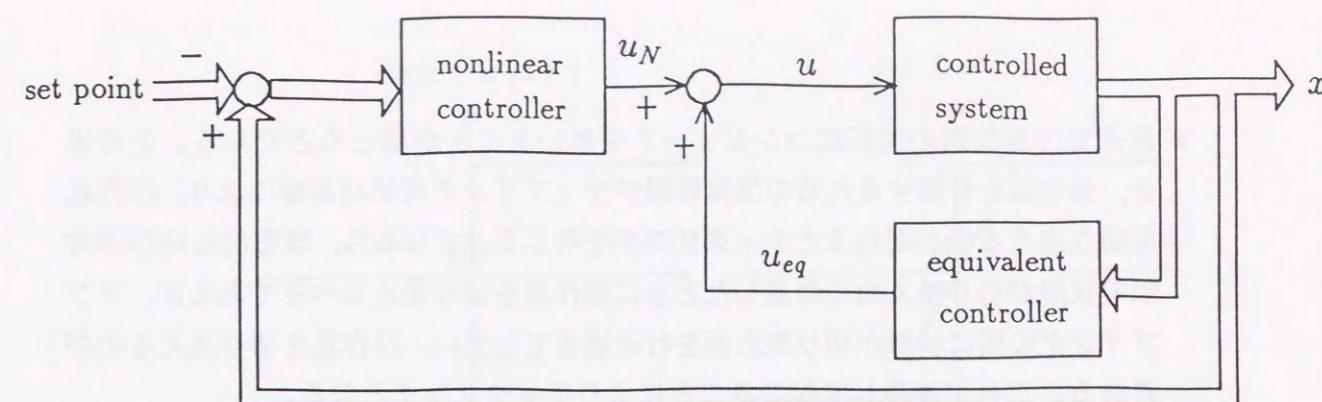


Fig.1.9 Block diagram of the closed-loop system with the control strategy.

とおくと、 $\sigma \dot{\sigma} < 0$ が成り立つための $f(\sigma, x, t)$ がいくつか提案されている [187]。例えば $f(\sigma, x, t) = -\delta \operatorname{sgn}(\sigma)$ とおいて $\delta > 0$ であればよい。

可変構造制御則の多くの研究は、このように対象システムの状態が切り換え面上にある時にその漸近安定性を保証するための等価操作量 u_{eq} と、状態を切り換え面に拘束させるための非線形な操作量 u_N とからなる。可変構造制御則を適用した時のブロック線図を Fig.1.9 に示す。

1.5 上記制御則の問題点

Leitmann らによる制御則や可変構造制御則を実際のシステムに適用する場合、 sgn 関数は不連続な関数であるため、状態が切り換え面に拘束されている時には操作量がチャタリング（高周波振動）を生ずる。チャタリングは操作部に負担をかけて破損させるとか、考慮外のシステムの特性和共振を起こす可能性があるため、特に力学系では解決すべき重要な問題である。発表論文 [S-4] はロボットアーム間のジョイントの弾性を考慮しなかったために、その弾性が操作量のチャタリングと共振を起こし、激しい振動を生じることを示した。

一般には操作量の不連続性を避けるために sgn 関数を近似した sat 関数 (Fig.1.10 参照) を用いて制御則を実行する。 sat 関数は理論的には滑らかな操作量を実現するはずであるが、本質的には不連続関数を近似した関数であるために、主に次の三つの原因からチャタリングを起こすことが多い。

- 最近では制御則の実行にコンピュータを用いることがほとんどである。その場合、操作量を計算するための演算時間やサンプリング周期の影響により、操作量を切り換えるのが遅れるとチャタリングを生じる。すなわち、理想的には制御対象の状態が切り換え面に到達したときに操作量を切り換えるべきであるが、サンプリングの間に状態が切り換え面を行き過ぎてしまい、操作量を切り換えるのが遅れる。これが連続して起こることによりチャタリングとなる。
- サンプリング周期や演算時間が短い場合でも、不確かさが大きいときには、それに応じて切り換える操作量が大きくなり（たとえ不確かさが小さくても得られる切り換え操作量が過大となる傾向がある）、制御対象の慣性力が強くなる。したがって、短い制御周期の間に状態が切り換え面を行き過ぎてしまい、より周波数の高いチャタリングを招く。
- アクチュエータなどに切り換え遅れがある場合、また、制御対象に切り換え遅れをもたらす要因がある場合も同様の現象を起こす。制御対象や調節部の機器特有の問題である。

これらの原因により、sat 関数を用いる制御則は連続であり、理論的には滑らかな操作量を実現するはずであるが、実際の適用に当たっては操作量がチャタリングを起こすことがほとんどである。このことは、これらの制御則の発展を妨げる重要な問題である。可変構造制御則を解説する、ほぼすべての文献において同じことが指摘されている。従って、従来よりこのチャタリングを低減化するための研究が行われており、次節においてそれらを説明する。

1.6 チャタリングを低減するための従来の研究と問題点

この節では、前節に述べた切り換え遅れによる操作量のチャタリングを低減するための従来の研究を説明する。

まず、ほとんどの研究において用いられている手法は、Fig.1.10 に示す sat 関数の ϵ の値を大きく設定して切り換え面近傍における操作量を小さくし、状態が切り換え面を大きく行き過ぎるのを避ける方法である。例えば、[81] [227] [147] [149] [153] [155] [231] [235] [180] [183] において用いられている。しかしながら、この手法では ϵ の値

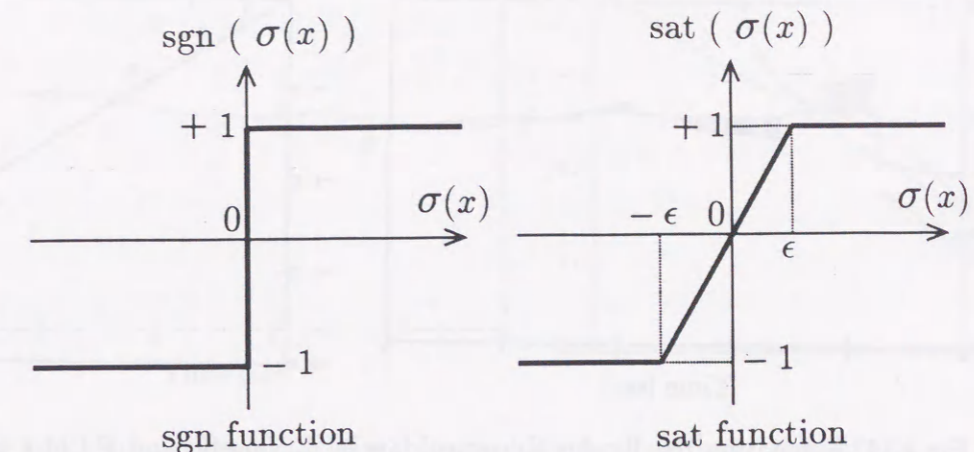


Fig.1.10 sgn function and sat function.

が大きくなる程、目標値への漸近性が劣化する [227]。言い換えれば、 ϵ をある小さな値に設定して制御則を実行したときに、チャタリングが起こるとする。これを避けるために ϵ を大きい値に変更する。ところが、この場合 $-\epsilon < 0 < \epsilon$ の範囲の中では比例制御になるために定常偏差が残る。すなわち、状態が切り換え面に対して漸近せずそのまま目標値に向かうので最終的に目標値に対しても定常偏差を残す。

この他に、チャタリングを低減するための研究がいくつか行われている。これを順に説明する。

- 積分動作を入れることで漸近性を向上させる
この研究は、あらかじめチャタリングが起きないように ϵ を大きな値に設定する。その場合、目標値に対して定常偏差が残るので、これを積分動作により減らす研究である。しかしながら、この手法では制御則の実行時における計算量が増大し、積分時間を選ぶ指針が今だ示されていない。選び方によっては積分動作を加えない場合よりもチャタリングが激しくなる。
- 追従制御問題に対してフィードフォワード制御を用いる研究 [230]
理想モデルの微分値を計算してフィードフォワード制御を行う。従って、制御対象の理想的な完全な数式モデルが必要となる。
- 切り換え面を対象システムの状態に合わせて適応的に更新する研究 [229] [228] [238]

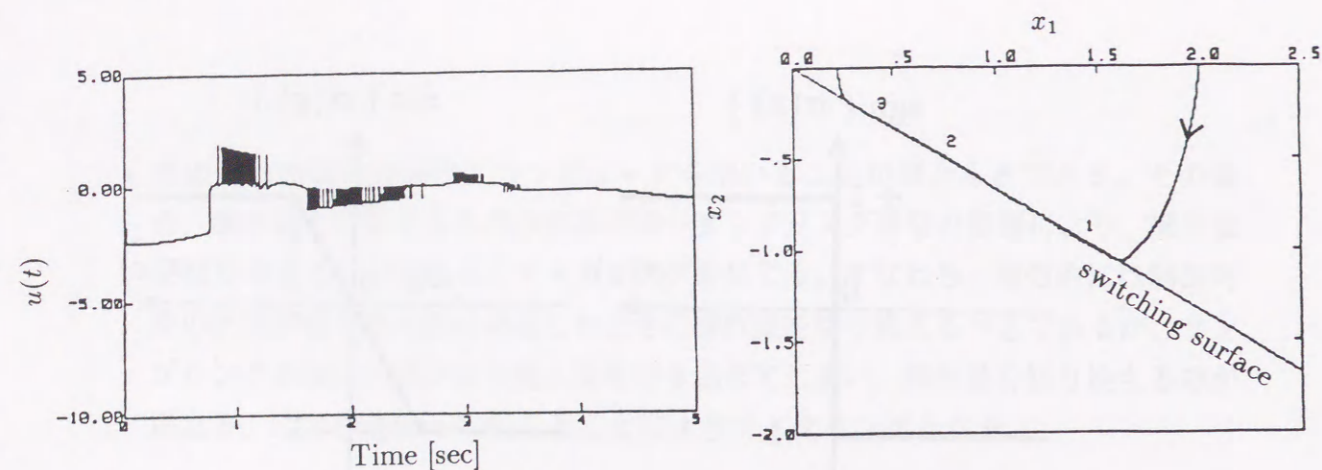


Fig.1.11 Simulation results due to control law by L.Ning-Su and F.Chun-Bo

この手法は応答が悪くなり、ロバスト性が弱くなることが指摘されている。また、計算量が多いことが指摘されている。

● L.Ning-Su, F.Chun-Bo による提案 [183]

この研究は、切り換え面の近傍内で sgn 関数を積分変換によって連続化したことに特徴がある。計算量が非常に多くなること、制御則のパラメータの設定の指針がなく選定が難しいことなどの問題点がある。この制御則をある2次システムに適用したシミュレーション結果（発表論文 [S-5] において発表）を Fig.1.11 に示す。対象システムに含まれた外乱の影響により、チャタリングを生じ、目標値に到達していないことがわかる。

● F.J.Chang らによる提案 [189]

この制御則は二つの局面からなる。ひとつは切り換え面に最短時間で到着させる制御則であり、もう一つはスライディングモードにあるときの制御則である。この二つの制御則が切り換わる時をシステム方程式の遷移行列から算出して予測し、チャタリングが起きないようにアルゴリズムにより制御則を切り換える原理である。制御対象は2次システムに限定されている。この制御則をある2次システムに適用したシミュレーション結果（発表論文 [S-5] において発表）を Fig.1.12 に示す。チャタリングが起きていないが、目標値に到達していないことがわかる。

Leitmann らによる制御則および可変構造制御則におけるチャタリングの低減化は重要であり、今述べたようにいくつかチャタリングを低減化する研究が行われている。

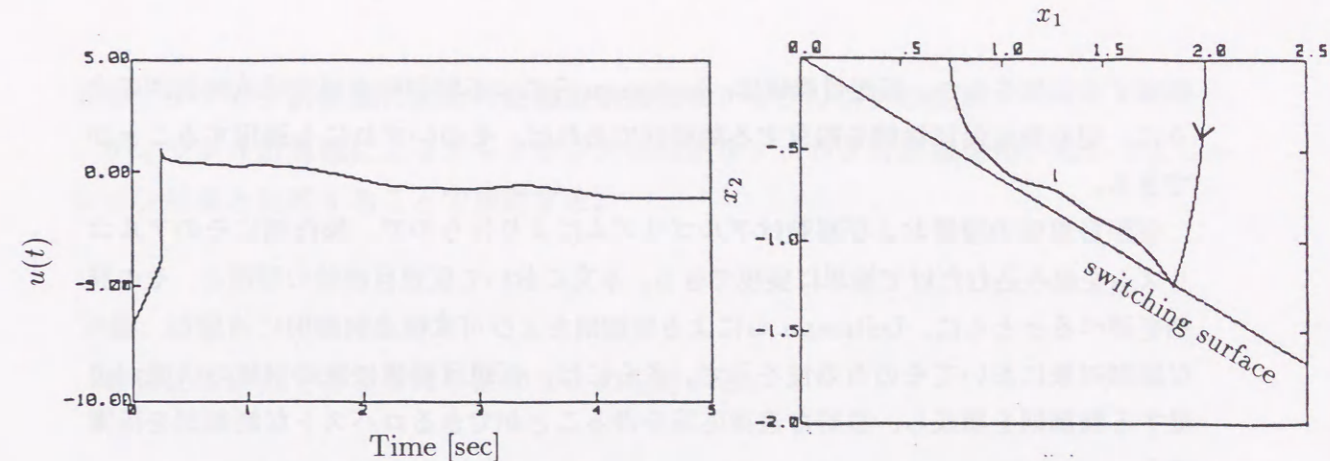


Fig.1.12 Simulation results due to control law by F.J.Chang and others.

しかしながら、それらはいずれも制御対象を限定したり、構成が本来の制御則よりも複雑になる、計算量が非常に多い、などの問題がある。そこで、次の要求を満たす新しいチャタリング低減法が必要である。

- Leitmann らによる制御則と可変構造制御則などの切り換える構造をもつ制御則に簡単に適用できること。
- 目標値への漸近性を劣化せずに、チャタリングを低減すること。
- 適用できる制御対象を限定しないこと。
- 定値制御および追従制御問題にも有効であること。

1.7 本研究の目的と構成

本論文では、チャタリング低減化の新しい手法として仮想目標値の構想を提案し、その有効性を示すことを目的とする。仮想目標値とは、切り換え面上にて、制御対象の状態に近い位置に設置し、状態が真の目標値まで移動する応答速度よりもやや速い速度で真の目標値までアルゴリズムにより移動するものである。そして、真の目標値からではなく、状態に近いところにある仮想的な目標値からの偏差により操作量を求めることにより、切り換える操作量を低減化することができ、その結果チャタリングが

低減する効果をもつ。仮想目標値は、Leitmann らによる制御則や可変構造制御則のように、切り換え面に状態を拘束する制御則であれば、そのいずれにも適用することができる。

仮想目標値の設置および移動はアルゴリズムにより行うので、操作部にそのアルゴリズムを組み込むだけで簡単に実現できる。本文において仮想目標値の原理と、その詳細を述べるとともに、Leitmann らによる制御則および可変構造制御則に適用し、様々な制御対象においてその有効性を示す。さらには、仮想目標値に制御対象の状態が追従する制御則を構成し、良好な追従応答を得ることができるロバストな制御則を提案する。

以下、本論文の各章の内容について述べる。

2章：仮想目標値による不確定線形システムの制御

仮想目標値の原理を説明し、線形不確定システムのための Leitmann らによる制御則に適用する。例題として1リンクマニピュレータの定値および追従制御問題を考える。そのマニピュレータは、負荷、摩擦係数およびトルクに変動を持つ。仮想目標値を持たない Leitmann らによる制御則を適用した場合には激しいチャタリングを起こすが、仮想目標値を適用することにより著しくチャタリングを低減化できることを示す。

3章：可変構造制御則における仮想目標値の役割

仮想目標値を適用した可変構造制御則を提案する。Leitmann らによる制御則だけでなく、可変構造制御則にも簡単に仮想目標値を適用でき、その結果チャタリングを低減化できることを示す。

4章：不確かさを含むマニピュレータの仮想目標値によるロバスト制御

仮想目標値を適用した可変構造制御則を負荷と摩擦係数の変動をもつ2リンクマニピュレータの制御問題に適用し、その有効性を示す。

5章：仮想目標値によるバッチ反応プロセスの温度追従制御

あるバッチプロセスの温度パターン追従制御問題に対して、仮想目標値の概念を適用した可変構造制御則を構成し、従来のPI制御や可変構造制御則では達成できなかった良好な応答が得られることを示す。

6章：アナログ計算機による可変構造制御則のチャタリングの検討

デジタル計算機によるチャタリングの発生をアナログ計算機を用いたシミュレーション結果と比較することで検討する。

7章：結論

最後に本研究で提案した手法のまとめを述べる。

第 2 章

仮想目標値による不確かさを含む線形システムの制御

2.1 はじめに

本研究では従来の Leitmann らによる制御則を適用したときの応答を観察した際、状態点が目標値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値（仮想目標値, Fictitious Set Point; FSP）を切り換え面上の状態点の近くに設置し、状態点がそれに向かって動き出す頃に、それよりやや早い速度でその仮想目標値を真の目標値方向に動かすことを考えた。(Fig.2.1 参照)

この原理は、童話の<馬と人参>による。馬（対象システムの状態）をゴール（真の目標値）まで走らせる時に、ゴールを目指して走らせるのではなく、目の前に人参（仮想目標値）を置いて、その人参をアルゴリズムにより真の目標値まで動かすというア

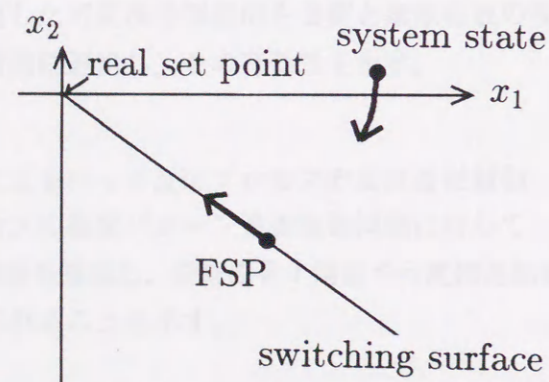


Fig.2.1 Fictitious Set Point (FSP).

イディアである。つまり、状態点と真の目標値との間で状態点に近いところに仮想的な目標値をおく。そして、真の目標値からではなく、仮想的な目標値からの偏差により操作量を求めることにより、切り換える操作量を低減化させ、その結果チャタリングが低減するものである。

これは、制御則が保証する内容を変更せずに切り換える操作量を抑えることにより、操作量のチャタリングを低減化する方法である。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。また、仮想目標値の設置および移動はアルゴリズムにより行うので、操作部にそのアルゴリズムを組み込むだけで簡単に実現できる。

以下に、まず、適用する Leitmann らによる制御則を説明し、仮想目標値について述べる。その後、仮想目標値を適用しても基本となる制御則が保証する内容が変化しないことを示す。1リンクマニピュレータを例題として取り上げ、定値制御および追従制御を行い、仮想目標値の有効性を示す。

2.2 不確かさを含む線形システムの制御

2.2.1 対象とする線形不確定動的システム

次に示す線形不確定動的システムを考える。

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A(r(t))]x(t) + [B + \Delta B(s(t))]u(t) + Cv(t) \quad (2.1)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (\text{初期値を未知とする}) \quad x \in R^n, u \in R^m, r \in R^p, s \in R^q, v \in R^l$$

ここで A は定数 $n \times n$ のシステム行列、 B は定数 $n \times m$ の入力行列、 C は定数 $n \times l$ の行列である。また、 ΔA はパラメータ r による $n \times n$ のシステム行列の不確かな変動、 ΔB はパラメータ s による $n \times m$ の入力行列の不確かな変動。 $Cv(t)$ 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、 $x = \{0\}$ を目標値とする。ただし、この目標値は対象システムの平衡点とする。したがって、 $x(t)$ は平衡点からの偏差を表し、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) 式のシステムは次のような仮定を満足するものとする。

<< 仮定 >>

(1) ΔA と ΔB はあらかじめ規定された関数であり、それぞれ R^p と R^q において連続である。

(2) 不確定パラメータ

$$r(\cdot) : R^1 \rightarrow R, s(\cdot) : R^1 \rightarrow S, v(\cdot) : R^1 \rightarrow V$$

はルベグ可測であり、ここで $R \subset R^p, S \subset R^q, V \subset R^l$ は適用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) は可制御とする。

(4) 次のような $D(\cdot), E(\cdot), F$ 行列が存在する。

$$\begin{aligned} \Delta A(r) &= BD(r) \quad \forall r \in R \\ \Delta B(s) &= BE(s) \quad \forall s \in S \\ \Delta C &= BF \end{aligned} \quad (2.2)$$

これは、いわゆるマッチング条件と呼ばれており、この条件を緩和する研究が数多く報告されている [125] ~ [134]。

(5) すべての $(x, t) \in R^n \times R$ において

$$\max \|E(s)\| < 1 \quad (2.3)$$

を満足すること。

2.2.2 従来の制御則について

(2.1) 式の安定性を保証する制御則として、Leitmann らは次式を提案している [77] [78]。

$$\begin{aligned} u &= Kx + p(x) \\ p(x) &= \begin{cases} -\text{sgn}(B^T Lx) \cdot \rho(x) & \text{if } \|B^T Lx\| > \epsilon \\ -(B^T Lx/\epsilon) \cdot \rho(x) & \text{if } \|B^T Lx\| \leq \epsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Kx は不確かさを零とおいたノミナルシステムを制御するための線形制御則である。ここで、

$$\bar{A} \triangleq A + BK \quad (2.5)$$

とおく。 $p(x)$ は不確かさを補償するための操作量、 L は Lyapunov 方程式

$$L\bar{A} + \bar{A}^T L + Q = 0 \quad (2.6)$$

の解である正定対称行列である。 Q は任意の正定対称行列である。

以下、 $\rho(x)$ を導出する。

(2.2) 式、(2.4) 式を (2.1) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A + \Delta A(r(t))]x(t) + [B + \Delta B(s(t))]u(t) + Cv(t) \\ &= [A + BD(r)]x(t) + [B + BE(s)]u(t) + BFv(t) \\ &= [A + BD(r)]x(t) + [B + BE(s)](Kx(t) + p(x)) + BFv(t) \\ &= \bar{A}x(t) + Bp(x) + BD(r)x(t) + E(s)Kx(t) + E(s)p(x) + Fv(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

を得る。ここで、すべての不確かさをまとめて

$$e(x, t) \triangleq D(r)x(t) + E(s)Kx(t) + Ep(x) + Fv(t) \quad (2.8)$$

とおき、上式に代入すれば、

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + Bp(x) + Be(x, t) \quad (2.9)$$

を得る。(2.8) 式の両辺のノルムをとり、不確かさの最大値を考慮して次のように $\rho(x)$ を定義する。

$$\begin{aligned} \|e(x, t)\| &= \|D(r)x(t)\| + \|E(s)Kx(t)\| + \|Ep(x)\| + \|Fv(t)\| \\ &\leq \max \|D(r)x(t)\| + \max \|E(s)Kx(t)\| + \max \|Ep(x)\| + \max \|Fv(t)\| \\ &\triangleq \rho(x) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$\rho(x)$ 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正のスカラ関数である。仮定 (5) および (2.4) 式より (2.10) 式を $\rho(x)$ について解くことができる。その結果、

$$\begin{aligned} \rho(x) &= (1 - \max \|E(s)\|)^{-1} (\max \|D(r)x(t)\| + \max \|E(s)\| \cdot \|Kx(t)\| \\ &\quad + \max \|Fv(t)\|) \end{aligned} \quad (2.11)$$

を得る。ここで、

$$\rho(x) \leq a + b\|x(t)\| \quad (2.12)$$

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

とおくことができる。

なお、(2.4)式において sat 関数を用いているが、初期に提案された研究 [71] [72] [74] [75] では sgn 関数を使っている。これは、sgn 関数は不連続関数であるために実現が難しく、さらに操作量が激しいチャタリング（高周波振動）を起こすために、この関数を近似した飽和（sat）関数を使うことが提案されている [73] [77] [78] [81] (Fig.2.2 (a) 参照)。なお、同図 (b) の関数を用いた同様な制御則を G.Ambrosino らが提案している。

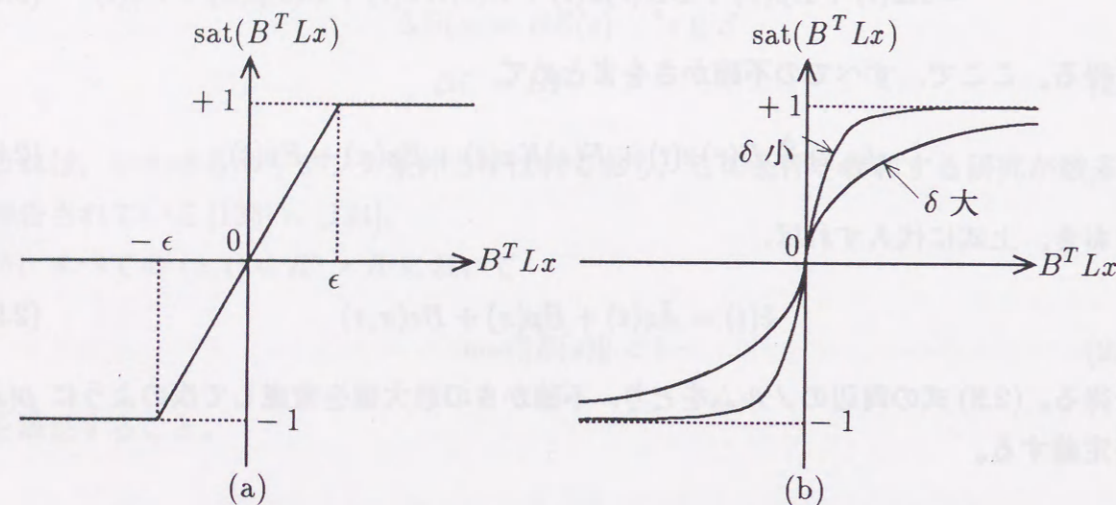


Fig.2.2 Saturation (sat) functions.

2.2.3 従来の制御則が保証する安定性

前述の制御則が保証する安定性について、次の定理が示されている。

《定理 1》

仮定 (1) ~ (5) を満足するシステム (2.1) 式に (2.4) 式を適用する。そのとき、あらゆる初期条件において (2.1) 式の一様有界性および一様終局有界性を保証する。

一様有界性とは、対象システムの状態が、目標値である平衡点を中心とした初期位置を含むある大きさの超球の中に必ずあるという保証であり、一様終局有界性とは、状

態が、目標値である平衡点を中心とした、ある小さな超球の中に到達し、その中に拘束されることをいう。この一様終局有界性の超球を本論文では終局有界領域と称する。

《証明》

次に、この定理の証明を示す。Lyapunov 関数の候補を Lyapunov 方程式 (2.6) 式の解 L を用いて

$$V(x(t)) = x^T Lx \quad (2.13)$$

とする。その導関数は、

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &= 2x^T L\dot{x} \\ &= 2x^T L[\bar{A}x(t) + Bp(x) + Be(x, t)] \\ &= -x^T Qx + 2x^T LB[p(x) + e(x, t)] \\ &= -x^T Qx + 2(B^T Lx)^T [p(x) + e(x, t)] \\ &\leq -x^T Qx + 2(B^T Lx)^T [p(x) + \frac{B^T Lx}{\|B^T Lx\|} \rho(x)] \end{aligned} \quad (2.14)$$

となる。ここで、 $\|B^T Lx(t)\| \geq \epsilon$ のとき、 $p(x) = -\text{sgn}(B^T Lx) \cdot \rho(x)$ であるから上式の第 2 項は零とおくことができる。もし、 $\|B^T Lx\| < \epsilon$ であれば、その最大値は $(\epsilon/2)\rho(x)$ である。その結果、

$$\dot{V}(x(t)) \leq -x^T Qx + \frac{\epsilon}{2}\rho(x) \quad (2.15)$$

となる。したがって、

$$x^T Qx - \frac{\epsilon}{2}\rho(x) > 0 \quad (2.16)$$

を満足するすべての x において、

$$\dot{V}(x(t)) < 0 \quad (2.17)$$

が成り立つ。しかしながら、 Q は正定行列であるから、

$$\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 \leq x^T Qx \leq \lambda_{\max}(Q)\|x\|^2 \quad (2.18)$$

の関係が成り立ち、さらに、 $\lambda_{\min}(Q) > 0$ が成り立つ。ここで $\lambda_{\min}(Q)$ は行列 Q の最小固有値を表す。(2.16) 式をさらに書き直すと、

$$\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 - \frac{\epsilon}{2}(a + b\|x\|) > 0 \quad (2.19)$$

となり、この式を x について解けば、終局有界領域の半径 r を得る。

$$r = \frac{\epsilon a}{4\lambda_{\min}(Q)} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon a}{4\lambda_{\min}(Q)}\right)^2 + \frac{\epsilon b}{2\lambda_{\min}(Q)}} \quad (2.20)$$

定理およびその証明の詳細については、文献(例えば [77], [78])を参照のこと。

なお、制御則に sgn 関数を持ちいれば $\epsilon = 0$ となるから終局有界領域は零となり、この場合、制御則は対象システムの一様漸近安定性を保証する。一様漸近安定性とは、対象システムの状態が限りなく目標値である平衡点に近づくことをいう。

2.3 仮想目標値の導入

前節で紹介した制御則を用いると、第1章にて述べたように操作量の切り換え遅れによるチャタリングがあるときは、 ϵ の値を大きくする必要があるが、同時に保証する終局有界領域が大きくなる。したがって、保証する終局有界領域を小さくする要求と、チャタリング低減化の要求は相反するものであり、同時に満たすことは困難である。そこで、本研究では新たに仮想目標値 $f_s(t)$ の導入を提案する。これは、Fig.2.1 に示すように切り換え面上に仮想目標値 $f_s(t)$ を設定してそれを移動させ、その仮想目標値 $f_s(t)$ と状態 $x(t)$ との間の偏差を (2.21) 式のように $e_f(t)$ と定義して、それにより操作量を求めるものである。

$$e_f(t) \triangleq x(t) - f_s(t), \quad e_f \in R^n, f_s \in R^n \quad (2.21)$$

この仮想的な偏差 $e_f(t)$ を用いるには、(2.11) 式の $\rho(x)$ 中の $x(t)$ を $e_f(t)$ に置き換えればよい。そうすることで、 $\rho(x)$ 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めざす。

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値 $f_s(t)$ の設定、および移動方法について述べる。

2.4 仮想目標値を適用した制御則の安定性

《定理2》

仮定(1)～(5)を満足するシステム(2.1)式を考える。仮想目標値 $f_s(t)$ を切り換え面上にて次の方法により移動させた場合、(2.11)式の $\rho(x)$ 中の $x(t)$ を(2.21)式による偏差 $e_f(t)$ に置き換えて求めた操作量は、すべての不確かさについて、 $\|B^T Lx\| > \epsilon$ 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、その仮想目標値 $f_s(t)$ を最終目標値である真の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。

仮想目標値 $f_s(t)$ は、次式のように切り換え面上を初期位置 $f_s(0)$ と速度 β を与えてアルゴリズムにより真の目標値まで移動する。

$$\begin{cases} f_s(t) = f_s(0) \cdot e^{(-\beta t)} \\ B^T L f_s(t) = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\beta \leq \frac{1}{2\lambda_{\max}(Q^{-1}L)} \quad (2.23)$$

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

$$\begin{cases} \|f_s(0)\| = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)} \|x(0)\| \\ B^T L f_s(0) = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

《証明》

仮想目標値 $f_s(t)$ を有限時間で $x = \{0\}$ (平衡点、すなわち真の目標値) に到達させるのであるから、一様終局有界性については定理1がそのまま成立する。ここでは仮想目標値 $f_s(t)$ からの偏差 $e_f(t)$ による $\rho(e_f)$ を用いた操作量(2.4)式、すなわち $u = Kx + p(e_f)$ 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。

(2.9)式に(2.21)式を代入し、(2.8)式の関係を用いると

$$\dot{x} = \bar{A}x + Bp(e_f) + Be(e_f, t) + B(D + EK)f_s \quad (2.25)$$

$$\text{ここで、} \quad e(e_f, t) \triangleq De_f + EK e_f + Ep(e_f) + Fv \quad (2.26)$$

$$\|e(e_f, t)\| \leq \rho(e_f) \quad (2.27)$$

次に、Lyapunov関数の候補を

$$V(x(t)) = x^T Lx$$

とする。Lyapunov 導関数を求めると、

$$\dot{V}(x) = -x^T Q x + 2x^T L B(p(e_f) + e(e_f, t)) + (D + EK)f_s$$

(2.21) 式 $x = e_f + f_s$ の関係を用いて上式をさらに変形すると、

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & -x^T Q x + 2(B^T L e_f)^T (p(e_f) + e(e_f, t)) + (D + EK)f_s \\ & + 2(B^T L f_s)^T (p(e_f) + e(e_f, t)) + (D + EK)f_s \end{aligned}$$

(2.22) 式の $B^T L f_s = 0$ より

$$\dot{V}(x) = -x^T Q x + 2(B^T L e_f)^T (p(e_f) + e(e_f, t)) + 2(B^T L e_f)^T (D + EK)f_s$$

$B^T L e_f = B^T L(x - f_s) = B^T L x$ の関係より

$$\dot{V}(x) = -x^T Q x + 2(B^T L x)^T (p(e_f) + e(e_f, t)) + 2(B^T L x)^T (D + EK)f_s \quad (2.28)$$

文献 [77] より、(2.28) 式の第 2 項は $\|B^T L x\| > \epsilon$ ならば常に零となる。 $\|B^T L x\| > \epsilon$ に限れば、 $\dot{V}(x) \leq 0$ となる条件は、

$$0 < \lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 \leq x^T Q x \leq \lambda_{\max}(Q)\|x\|^2 \quad (2.29)$$

より、(2.28) 式の第 1 項の最小値、および第 3 項の最大値を考えて変形すると、

$$\dot{V}(x) \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 + 2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)\|f_s\| \cdot \|x\|$$

したがって、 $\dot{V} \leq 0$ となるためには $\|x(t)\| \geq 0$ であるから、

$$\lambda_{\min}(Q)\|x\| - 2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)\|f_s\| \geq 0$$

であればよい。すなわち、

$$\|f_s(t)\| \leq \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)}\|x(t)\| \quad (2.30)$$

$t = 0$ のとき、仮想目標値を状態点により近い位置におくことを考えて

$$\|f_s(0)\| = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)}\|x(0)\|$$

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 $f_s(t)$ を移動させれば (2.30) 式を満足することになる。この $\|x(t)\|$ の減衰速度は文献 [106] において次式のように示されている。

$$\|x(t)\| \leq \|x(0)\| \cdot \exp(-t/2\lambda_{\max}(Q^{-1}L)) \quad (2.31)$$

よって、この減衰速度よりも速く $f_s(t)$ を移動させるには、(2.23) 式において $\exp(-\beta t) \geq \exp(-t/2\lambda_{\min}(\cdot))$ とすればよいから、

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

とすればよい。

ここで、(2.25) 式を満足する範囲が超球 (半径 $\|f_s(0)\|$) と切り換え面 ($B^T L x = 0$) との交線、すなわち円周となる場合がある。そのような場合に、チャタリングの低減化をめざすためには、まず第一に状態点と仮想目標値の距離が小さい方が偏差 e_f が小さくなり、それに応じて操作量 $p(e_f)$ が小さくなるのでチャタリングの低減化により有効である。したがって、その円周上のうち初期状態 $x(0)$ と最も近い位置を仮想目標値の初期位置とし、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。

2.5 例題

仮想目標値の有効性を実証するために、簡単な例題により仮想目標値 $f_s(t)$ 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。

2.5.1 制御対象

水平面を回転する簡単なアーム (Fig.2.3) 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、

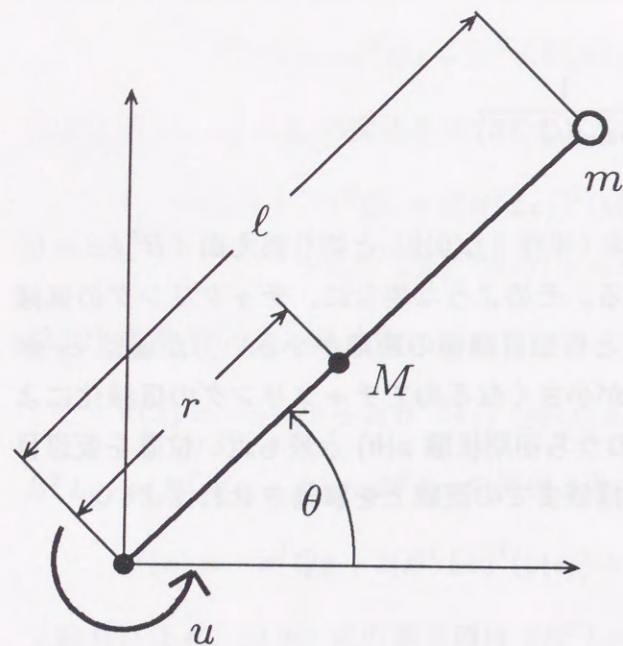
$$\{J + Mr^2 + (m + \Delta m)\ell^2\}\ddot{\theta} + (C + \Delta C)\dot{\theta} = u + \Delta u$$

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

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

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。

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



Parameters		
M	1.2	[Kg]
m	0.25	[Kg]
l	0.3	[m]
r	0.15	[m]
J	0.009	[Kg · m ²] (moment of inertia)
C	0.02	[Nms/rad] (coefficient of friction)
u	torque	[Nm]
θ	angular position	[rad]

Fig.2.3 One-link robotic arm.

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 0.01 [sec] とし、 Δm については変動を Fig.2.4 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。

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

この制御対象に対して次の初期偏差を与える。

$$\theta(0) = -1.5 \pi \text{ [rad]}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \text{ [rad/s]}$$

制御目的は、この偏差を零にすることである。

2.5.2 制御則の決定

Fig.2.3に示す各値を代入して整理すれば、

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (-0.342 + r)x_2 + (20.06 + s)u \end{cases} \quad r \in [-0.218 \ 0.491], \quad s \in [-8.95 \ 10.5]$$

となる。これを用いて制御則を求める。(2.5) 式の \bar{A} の極を $-1 \pm j$, また (2.6) 式において $Q = I$ と設定した。その結果、

$$K = [k_1, k_2] = [-0.0997, -0.0826], \quad B^T Lx = 0.667x_1 + x_2 = 0$$

また、(2.11) 式より

$$\rho(x) = 2.1(|0.0245x_2| + 0.523|k_1x_1 + k_2x_2|)$$

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

2.5.3 仮想目標値の適用

仮想目標値 $f_s(t)$ を (2.22) 式 ~ (2.24) 式に基づいて設定し、前節の $\rho(x)$ を

$$\rho(e_f) = 2.1(|0.0245e_{f2}| + 0.523|k_1e_{f1} + k_2e_{f2}|)$$

として求める。 β の値は (2.24) 式より 0.7 と設定した。

なお、 $f_s(t)$ が終局有界領域内に到達した後は、真の目標値からの偏差により操作量を求める。

2.5.4 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.2.5 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 Fig.2.2 の (b) の飽和関数を用いたものであ

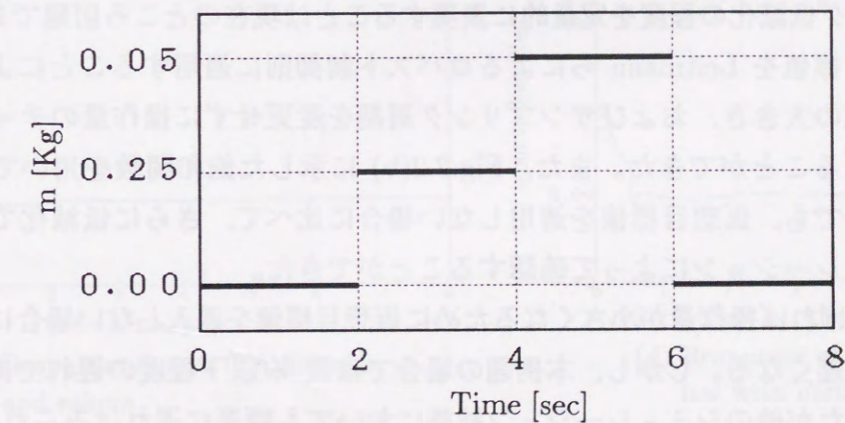


Fig.2.4 Load history.

る。著者らの提案する仮想目標値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.2.5 に応答時間として記入した。仮想目標値 $f_s(t)$ 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。

2.5.5 追従制御の場合

追従制御における仮想目標値の有効性を実証するために、真の目標値（平衡点、 $x = \{0\}$ ）をある程度の速さで変化させても本手法が有効であることを示す。目標値および初期値を次のように設定する。

$$\text{目標値} \begin{cases} \Theta_m(t) = 0.5 t \text{ [rad]} \\ \dot{\Theta}_m(t) = 0.5 \text{ [rad/s]} \end{cases} \quad \text{初期値} \begin{cases} \Theta(0) = -1.5 \pi \text{ [rad]} \\ \dot{\Theta}(0) = 0.0 \text{ [rad/s]} \end{cases}$$

制御量および入力トルクの時間経過を Fig.2.6 に示す。(a),(b),(c),(d) は前節と同じ条件による結果である。なお、 $|\Theta_m(t) - \Theta(t)| \leq 0.05$ [rad] を満足するまでの応答時間を調べ、その結果を Fig.2.6 に記入した。定値制御の結果と同様に仮想目標値を適用したことで明らかにチャタリングが低減することがわかる。この場合の応答時間の悪化はわずかに 1.3 % 以下であった。

2.6 まとめ

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、提案する仮想目標値を Leitmann らによるロバスト制御則に適用することにより、一樣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化させることができた。また、Fig.2.2(b) に示した飽和関数を用いて制御則を実行した場合でも、仮想目標値を適用しない場合に比べて、さらに低減化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値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、本例題の場合では数 % 以下程度の遅れであり、本論文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。

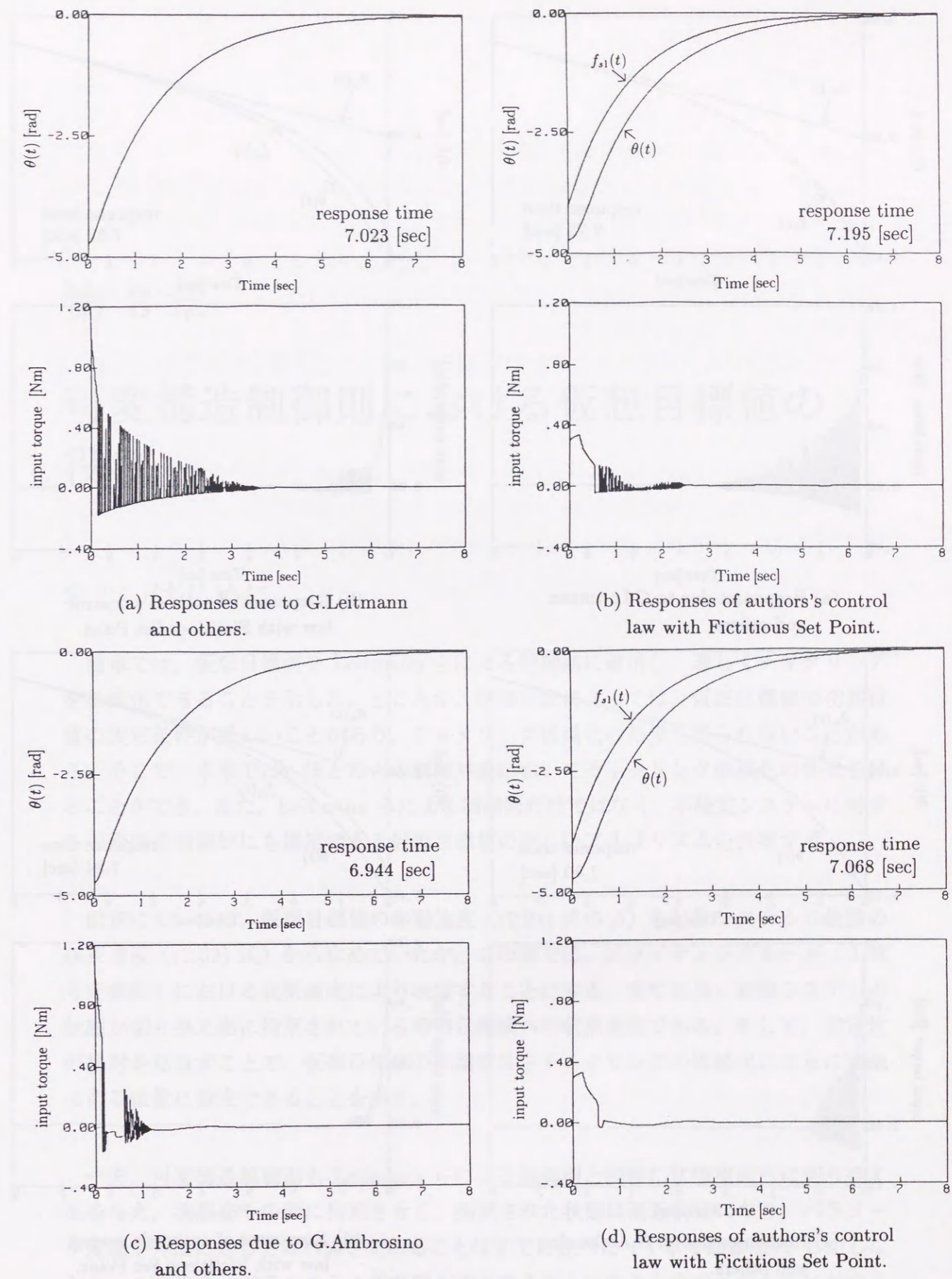


Fig.2.5 Results of simulation. (A case of constant desired value control.)

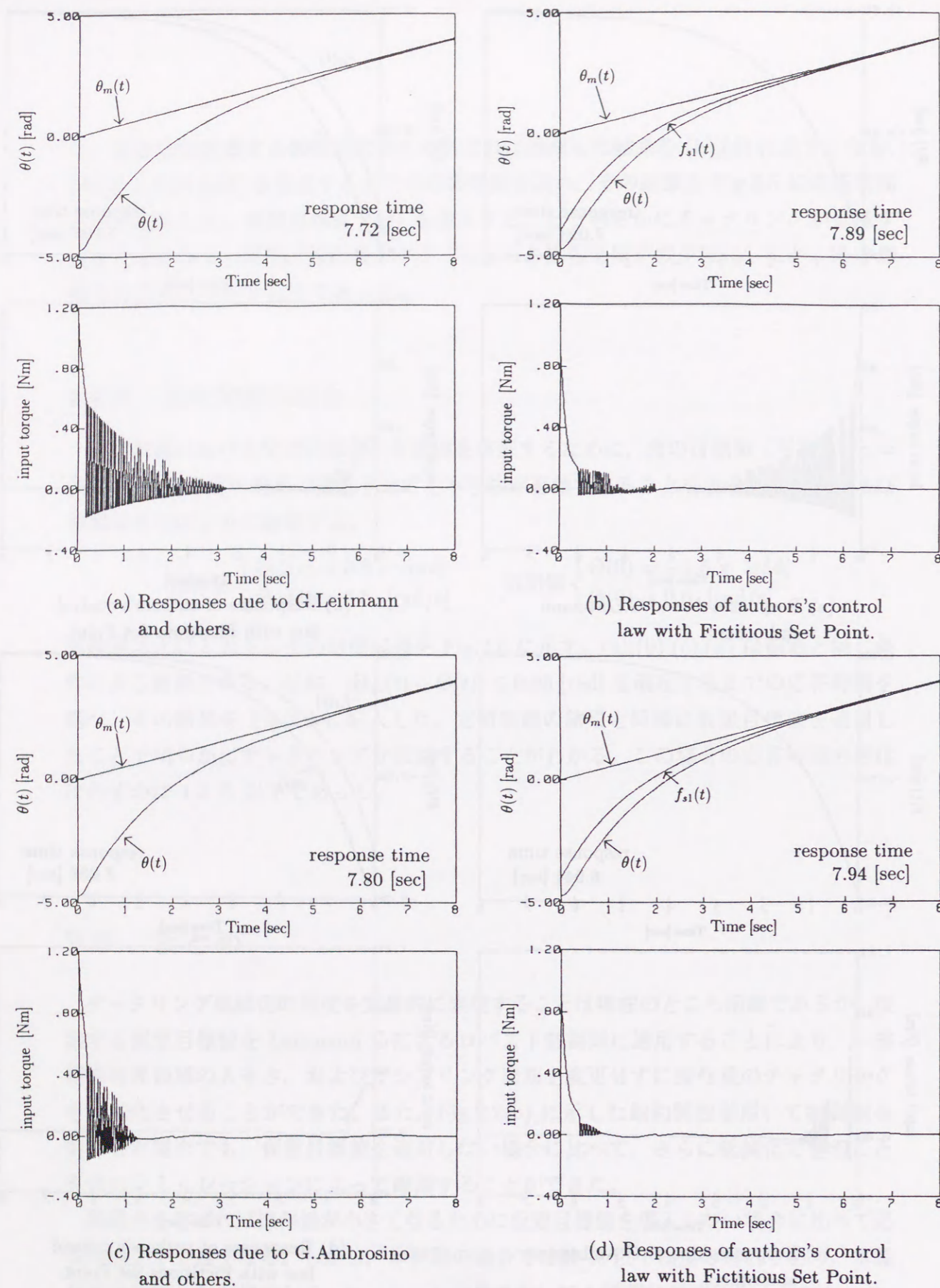


Fig.2.6 Results of simulation. (A case of tracking control.)

第 3 章

可変構造制御則における仮想目標値の役割

3.1 はじめに

前章では、仮想目標値を Leitmann らによる制御則に適用し、著しくチャタリングを低減化できることを示した。ところが、制御対象によっては、仮想目標値の初期位置の設定条件が厳しいことがあり、チャタリング低減化の効果を得られないことがある。そこで、本章では、ほとんどの制御対象においてチャタリング低減化の効果を得ることができ、また、Leitmann らによる制御則だけではなく、不確定システムに対する可変構造制御則にも適用できる仮想目標値の新しいアルゴリズムを提案する。

前章においては、仮想目標値の移動速度 ((2.24) 式の β) を対象システムの状態の収束速度 ((2.32) 式) から求めていたが、この章では、スライディングモード (1 章 4 節参照) における収束速度により決定することにする。すなわち、対象システムの状態が切り換え面に拘束されている時の目標値への収束速度である。そして、安定性の検討を見直すことで、仮想目標値の初期位置をチャタリングの低減化にさらに効果のある位置に設定できることを示す。

一方、可変構造制御則も Leitmann らによる制御則と同様に状態空間内に切り換え面を与え、状態をその面に拘束させる。拘束された状態は漸近安定になり、パラメータ変動や外乱に対してロバストであることはすでに述べた (1 章 4 節参照)。しかしながら、この場合、対象システムの状態が切り換え面上にあるときの不確かさに対するロバスト性を主張するものであり、不確かさを含む対象システムの状態が切り換え面

に向かうための条件を示してはいない。

不確定システムのための可変構造制御則の主な研究としては、文献 [81] [85] [86] [176] がある。これらの研究では、不確かさを評価するために、Leitmann らによる制御則において用いるマッチング条件（2章2節(2.2)式参照）を同じく用いる。そして、切り換える操作量は、対象システムの状態を切り換え面に向かわせると共に、不確かさを補償するという二つの役割をもつ。

この不確定システムのための可変構造制御則に対しても、仮想目標値を Leitmann らによる制御則と同様にして簡単に適用でき、チャタリング低減化において有効であることを示す。

本章の構成は、まず、Leitmann らによる制御則と可変構造制御則の類似点と相違点を述べる。次に、可変構造制御則の条件を用いた仮想目標値の新しいアルゴリズムを示す。最後に、不確定システムのための可変構造制御則に仮想目標値を適用し、この場合も簡単にチャタリングの低減化を実現できることを示す。

3.2 Leitmann らによる制御則と可変構造制御則の類似点と相違点

仮想目標値の新しいアルゴリズムを説明するための準備として、両制御則の類似点と相違点を述べる。まず、両研究の歴史的経過を Table.3.1 に示す。これは著者が調べたことであり、断定はできないが、二つの制御則の最も基本になる論文は同じ文献を参照している。その後、Leitmann らによる制御則は米国で、可変構造制御則は旧ソ連において、それぞれが独立に発展してきた。可変構造制御則が 1977 年 Utkin の展望論文 [140] により西側諸国にも知られるようになると、1982 年に二つの制御則の類似性が指摘され、その後は二つの長所を取り入れた研究も発表されるようになった。

不確かさを評価するためのマッチング条件は、1969 年旧ソ連の B.Draženić の研究 [135] において初めて現れるが、この条件は、切り換え面上にあるシステムはマッチング条件を満たす変動に対して不感（ロバスト）である、と述べられている。これに対して、Leitmann らは、マッチング条件を用いて不確かさを補償する制御則を求めることに成功している。

このように両制御則では類似点が多く、それをまとめると、

Table.3.1 可変構造制御則と Leitmann らによる制御則

可変構造制御則	Leitmann らによる制御則
1961	不連続な右辺を含む微分方程式の解についての研究, A.F.Filippov [1]
1963	あいまいな右辺を含む微分方程式の解 Yu.I.Aimov [67]
1963	不変性原理と V S S (可変構造システム) 理論 例えば [137]
1971	Utkin [135],[136]
1971	2人のゼロ和微分ゲームの研究 H.L.Stalford and G.Leitmann [68]
1975	線形微分ゲームの研究 S.Gutman and G.Leitmann [69]
1975	不確かなパラメータを含む 線形システムの制御 S.Gutman and G.Leitmann [70]
1977	Utkin 展望論文 [139]
1982	V S S 理論と Min-Max Control について (S.Gutman and Z.Palmor [78])
1984	V S C と Deterministic Control について [80],[84],[85]

- 状態空間内にあらかじめ切り換え面を与える。
- 線形制御則と非線形制御則からなる。
- 切り換え面に対する対象システムの状態の位置に応じて操作量を切り換える。
- 操作量の切り換えを sgn 関数を用いて実現する。したがって、操作量のチャタリングの問題をともに抱えている。

といえる。逆に相違点は、

- Leitmann らによる制御則では切り換え面を Lyapunov 方程式から求めるのに対し、可変構造制御則では極配置法を初めとして多くの設計方法がある。
- Leitmann らによる制御則では状態を切り換え面に拘束することを保証していないが、可変構造制御則では保証する。(Fig.3.1参照) ただし、不確かさの大きさによるが、著者の経験によれば、Leitmann らによる制御則において対象システムの状態が切り換え面に拘束されないことはほとんどない。
- Leitmann らによる制御則では線形制御則は不確かさを零とおいたノミナルシステムのための状態フィードバック則であるのに対し、可変構造制御則における線形制御則はノミナルシステムと切り換え面から求める等価操作量である。
- 切り換える操作量は、Leitmann らによる制御則では不確かさの最大値を考慮して求めるのに対し、可変構造制御則では、さらに対象システムの状態を切り換え面に向かわせるための操作量をつけ加える。このことについては、3.4節において詳しく述べる。

といえる。

このように、二つの制御則の類似点を考えて、可変構造制御則の研究において用いられる条件を Leitmann らによる制御則に適用することにより、切り換え面上における対象システムの応答を表すスライディングモード方程式(1章4節参照)を Leitmann らによる制御則を用いた場合に求めることができている [86]。次節では、これを用いて仮想目標値の新しいアルゴリズムを提案する。また、この章の最後では、両制御則の違いを考慮すれば、Leitmann らによる制御則に適用して効果のある仮想目標値を同様にして簡単に可変構造制御則に適用できることを示す。

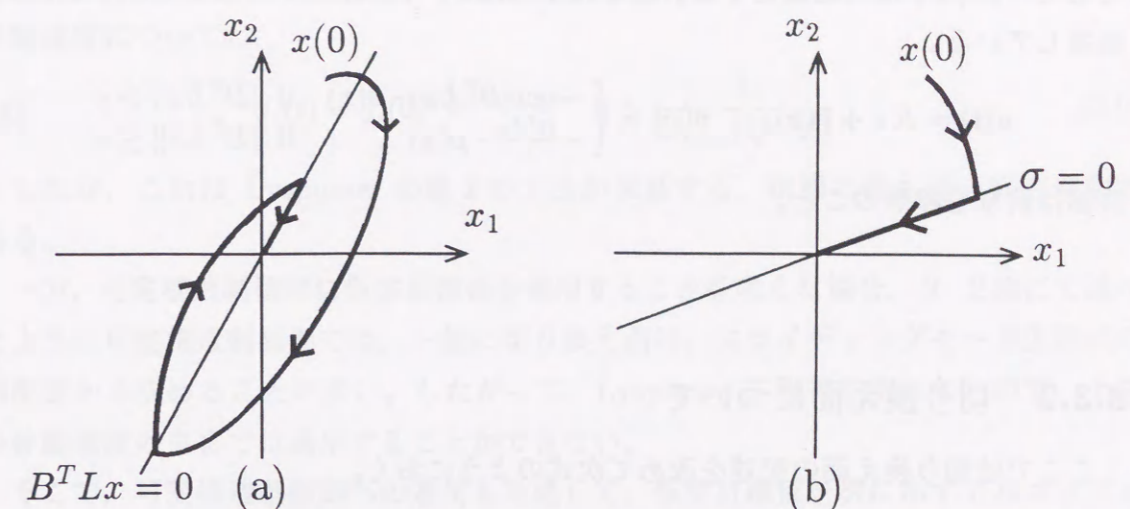


Fig.3.1 Typical closed-loop system trajectories for each control laws. (a) Responses due to Leitmann and others. (b) Responses due to VSC.

3.3 新しい仮想目標値のアルゴリズム

3.3.1 制御対象と Leitmann らによる制御則

ここでは仮想目標値の新しいアルゴリズムを分かりやすく説明するために、次の SISO システムを考える。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A + \Delta A]x(t) + [B + \Delta B]u(t) + Cv(t) \\ x(t_0) &= x_0 \text{ (initial states)}, \quad x \in R^2, \quad u \in R^1 \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで $x(t)$ は時刻 t におけるシステムの状態を表し、 $x = \{0\}$ を目標値とする。ただし、この目標値は対象システムの平衡点であるとする。したがって、 $x(t)$ は平衡点からの偏差を表し、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。 ΔA と ΔB は不確かさの行列である。 $Cv(t)$ は外乱を表す。これらの不確かさは、いわゆる Leitmann らのマッチング条件 [75] を満足するものとする ((2.2) 式)。

$$\Delta A = BD, \quad \Delta B = BE, \quad C = BF, \quad (3.2)$$

そして、 (A, B) は可制御とする。前章に示したが、Leitmann らは次に示す制御則を提案している。

$$u(t) = Kx + p(x), \quad p(x) = \begin{cases} -\text{sgn}(B^T Lx) \cdot \rho(x) & \text{if } \|B^T Lx\| > \epsilon \\ -\frac{B^T Lx}{\epsilon} \cdot \rho(x) & \text{if } \|B^T Lx\| \leq \epsilon \end{cases} \quad (3.3)$$

詳細は前章を参照のこと。

3.3.2 切り換え面について

ここでは切り換え面の記述を改めて次式のようにおく。

$$Sx = 0, \quad S \triangleq B^T L, \quad S \in R^{1 \times 2}, \quad (3.4)$$

ここで L は任意の正定 2×2 行列 Q を与えたときの Lyapunov 方程式

$$L\bar{A} + \bar{A}^T L + Q = 0 \quad (3.5)$$

の解である。ただし、

$$\bar{A} \triangleq A + BK, \quad K \text{ は } 1 \times 2 \text{ 定数行列} \quad (3.6)$$

とおいた。

今、対象システムの状態が切り換え面にないときを考えて、切り換え関数を

$$\sigma(x) \triangleq Sx \quad (3.7)$$

とおく。この関数の値は、状態が切り換え面上にあるときは零になる。

3.3.3 仮想目標値の新しいアルゴリズム

前章においては、仮想目標値の初期位置を

$$\|f_s(0)\| = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\|B^T L\|(\max\|D\| + \max\|EK\|)} \|x(0)\| \quad (3.8)$$

とおいたが、この式によると Q の選び方や不確かさの大きさにより $\|f_s(0)\|$ の値が小さくなる場合がある。そのときには、仮想目標値の初期位置が真の目標値の近くなり、チャタリング低減化の効果が著しく劣化する。

この章では、仮想目標値 $f_s(t)$ の初期位置を $\|f_s(0)\| = \|x(0)\|$ から定める。そして、移動速度については

$$f_s(t) = f_s(0) \cdot e^{(-\beta t)}, \quad \beta \leq \frac{1}{2\lambda_{\max}(Q^{-1}L)} \quad (3.9)$$

としたが、これは Lyapunov の第 2 の方法が保証する、状態の最も遅い収束速度である。

一方、可変構造制御則に仮想目標値を適用することを考えた場合、3.2 節にて述べたように可変構造制御則では、一般に切り換え面は、スライディングモード方程式の極配置から決めることが多い。したがって、Lyapunov 方程式を使わないので、上述の移動速度のままでは適用することができない。

そこで、可変構造制御則への適用も考慮して、仮想目標値を次に示すアルゴリズムにより実現する。切り換え面を $\sigma(x) = Sx = 0$, (1.8) 式とすると、

$$Sf_s(t) = 0, \quad f_s \in R^2 \quad (3.10)$$

$$\|f_s(t)\| = \|x(0)\| \cdot e^{(-\beta t)}, \quad -\beta \leq \lambda_{\min}([I - B(SB)^{-1}S] \bar{A}) \quad (3.11)$$

ここで $\lambda_{\min}(\cdot)$ は、行列 (\cdot) の最小固有値を表す。 $(\beta$ の負の符号は、 $1/(2\lambda_{\max}(Q^{-1}L))$ は正の値になるが、 $\lambda_{\min}([I - B(SB)^{-1}S] \bar{A})$ は負の値になるからである。) 仮想目標値は $Sf_s(t) = 0$ を満足させるように切り換え面上に維持し、さらに速度 β の指数関数により動かす。この値はスライディングモード方程式 [86]

$$\dot{x}(t) = [I - B(SB)^{-1}S] \bar{A}x(t)$$

の最も速い応答を示す極である。したがって、前章では定理が保証する最低限の収束速度を用いたが、今度は対象システムが切り換え面に到達して拘束されているときの理想的な収束速度を用いる。

このアルゴリズムによる仮想目標値を用いて、(3.1) 式で表されたシステムの制御を考える。(3.10) 式、(3.11) 式から状態 x に対応する仮想目標値の x_1, x_2 軸の各要素は

$$\begin{cases} f_{s1}(t) = \text{sgn}(x_1(0)) \frac{|x_1(0)|}{\sqrt{1+(s_1/s_2)^2}} \exp(\beta t) \\ f_{s2}(t) = -(s_1/s_2) \cdot f_{s1}(t) \end{cases} \quad (3.12)$$

により与えることができる。ここで $S = [s_1, s_2]$ とおいた。仮想目標値と状態との間の偏差を $e_f = [e_{f1}, e_{f2}]^T$ とおくと

$$e_f = x - f_s, \quad \begin{cases} e_{f1} = x_1 - f_{s1} \\ e_{f2} = x_2 - f_{s2} \end{cases} \quad (3.13)$$

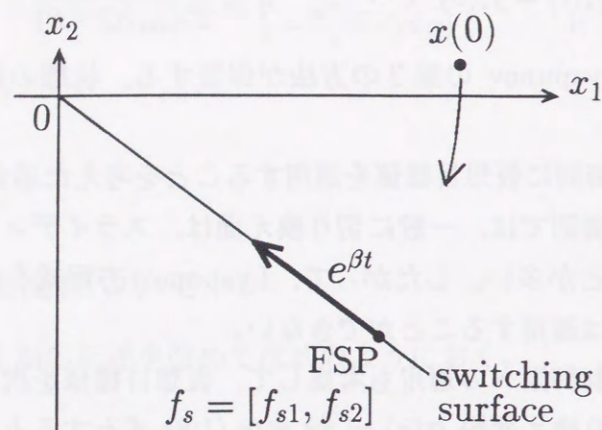
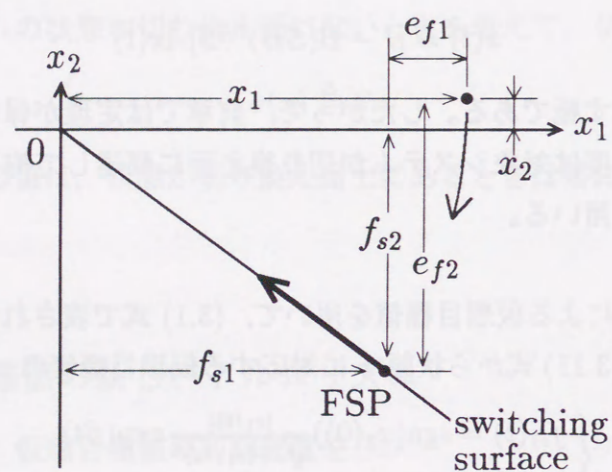


Fig.3.2 Fictitious Set Point (FSP).

Fig.3.3 Fictitious deviation $[e_{f1}, e_{f2}]^T$.

から仮想的な偏差 e_f を求める。(Fig.3.2, Fig.3.3 参照) この偏差を、切り換え操作量 $\rho(e_f)$ にて使う。

仮想目標値のアルゴリズムを Fig.3.4 に示す。仮想目標値はこのアルゴリズムを操作部に組み込むだけで簡単に実現することができる。

3.3.4 切り換え操作量の導出 (この導出の詳細は 2.2.2 節参照)

ここでは、仮想目標値を適用した場合の切り換える操作量 $\rho(e_f)$ を求める。(3.2), (3.3) 式と (3.6) 式を (3.1) 式に代入すると、

$$\dot{x} = \bar{A}x + Bp(x) + Be(x, t) \quad (3.14)$$

$$e(x, t) \triangleq Dx + EKx + Ep(x) + Fv \quad (3.15)$$

を得る。(3.15) 式の両辺のノルムをとり、 $\rho(x)$ を次のようにおく。

$$\|e(x, t)\| \leq \max\|Dx\| + \max\|EKx\| + \max\|E\| \cdot |p(x)| + \max\|Fv\| \triangleq \rho(x) \quad (3.16)$$

もし、 $\max\|E\| < 1$ ならば、(3.3) 式より (3.16) 式は $\rho(x)$ について解くことができる。

$$\rho(x) \triangleq (1 - \max\|E\|)^{-1}(\max\|Dx\| + \max\|EKx\| + \max\|Fv\|) \quad (3.17)$$

この切り換え操作量 $\rho(x)$ をそのまま用いるのではなく、第 2 章に示したのと同様に仮想目標値からの偏差 (3.13) 式を用いて、より小さな切り換え操作量 $\rho(e_f)$ を用いる。

$$\rho(e_f) \triangleq (1 - \max\|E\|)^{-1}(\max\|De_f\| + \max\|EK e_f\| + \max\|Fv\|) \quad (3.18)$$

3.3.5 安定性について

(3.18) 式を用いた場合の対象システムの安定性について述べる。Lyapunov 関数の候補を

$$V(x(t)) = x^T Lx$$

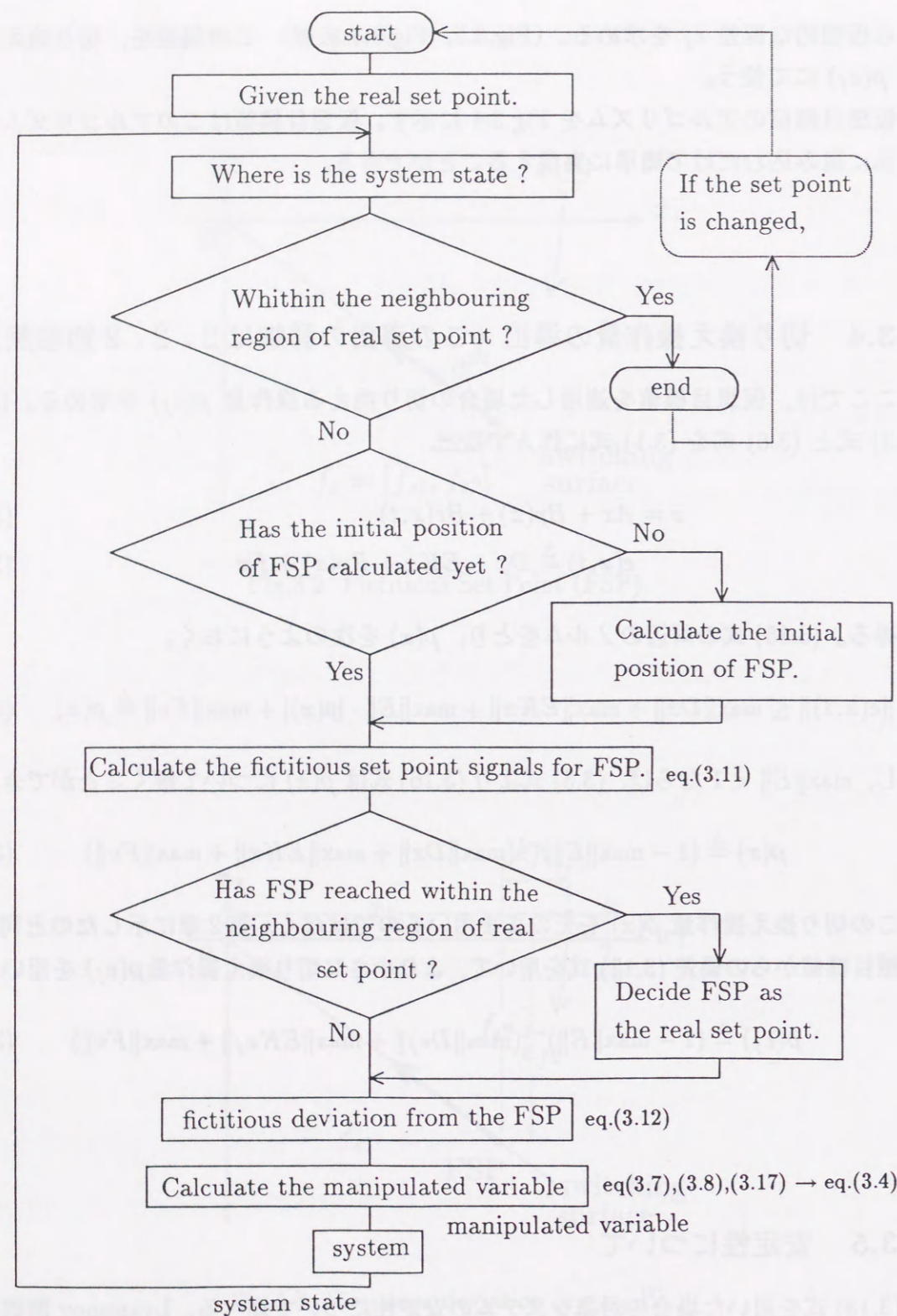


Fig.3.4 Flow chart for providing and moving Fictitious Set Point.

とおく。この導関数は

$$\dot{V} = -x^T Q x + 2(B^T L x)[p(e_f) + \epsilon(x, t)]$$

となる。さらに (3.12) 式および $B^T L x = B^T L e_f + B^T L f_s = B^T L e_f$ より、 \dot{V} は

$$\dot{V} = -x^T Q x + 2(B^T L e_f)[p(e_f) + (D e_f + E K e_f + E p(e_f) + F v) + (D f_s + E K f_s)]$$

となる。

ここで、 f_s は切り換え面上にあり、不確かさを表す D, E 行列はマッチング条件 (3.3) 式を満足するので、文献 [135] より $D f_s + E K f_s = 0$ が成立する。また、(2.18) 式および (3.3), (3.7), (3.16) 式を用いてさらに、上式を変形すれば、

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 + 2(\sigma)[- \text{sat}(\sigma) \cdot \rho(e_f) + \|e(e_f, t)\|]$$

が成り立つ。

もし $\|\sigma(x)\| > \epsilon$ ならば、そのとき

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 < 0$$

となるから、常に $\dot{V} < 0$ が成り立つ。

もし $\|\sigma(x)\| \leq \epsilon$ ならば、そのとき

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 + \left(\frac{\epsilon}{2}\right)a\|e_f\| + \left(\frac{\epsilon}{2}\right)b$$

となる。ここで (3.18) 式から a, b を次のようにおいた。

$$\rho(e_f) \leq a\|e_f\| + b, \quad \begin{cases} a \triangleq (1 - \max\|E\|)^{-1}(\max\|D\| + \max\|EK\|) \\ b \triangleq (1 - \max\|E\|)^{-1} \cdot \max\|Fv\| \end{cases} \quad (3.19)$$

$\|\sigma(x)\| \leq \epsilon$ の時、仮想目標値は真の目標値に対して対象システムの状態よりも内側にあるから、 $\|e_f\| \leq \|x\|$ が成り立つ。よって、

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 + \left(\frac{\epsilon}{2}\right)a\|x\| + \left(\frac{\epsilon}{2}\right)b \quad (3.20)$$

が成り立つ。 $\|\sigma(x)\| \leq \epsilon$ であるときに $\dot{V} < 0$ となる条件を得るために、平衡点 $x = \{0\}$ を中心とした閉球 $W(\eta)$ を考える。上式を $\|x\|$ について解けば、球の半径 η

$$\eta = \frac{\epsilon a}{4\lambda_{\min}(Q)} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon a}{4\lambda_{\min}(Q)}\right)^2 + \frac{\epsilon b}{2\lambda_{\min}(Q)}} \quad (3.21)$$

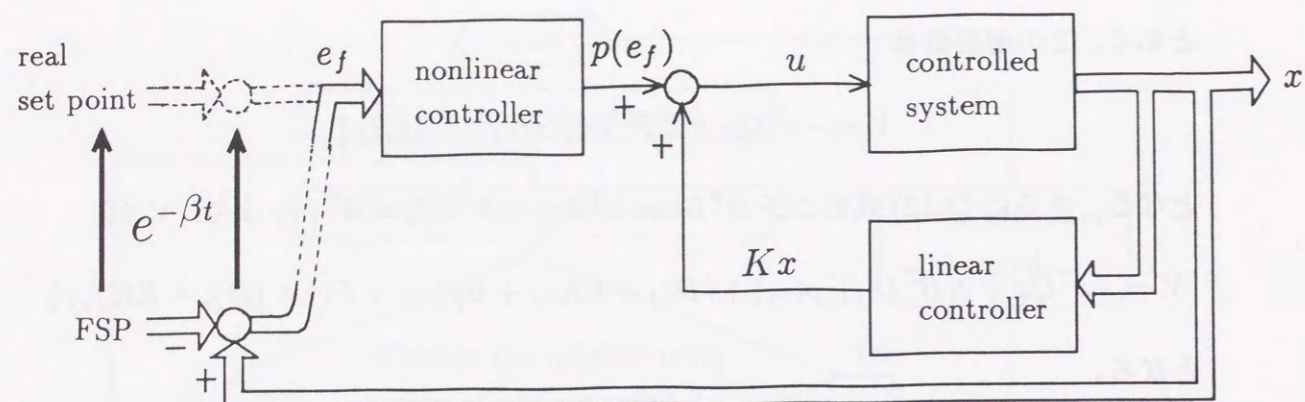


Fig.3.5 Block diagram of the control system by using FSP.

を得る。

したがって、仮想目標値を適用した制御則 (3.3) 式は、すべての許容した不確かさを含むシステム (3.1) 式の応答を半径 η の閉球 $W(\eta)$ に到達させ、そして、その中に拘束することを保証する。

この半径 η は仮想目標値とは全く関係なく、 ϵ の値から決まることが仮想目標値の特色のひとつである。

3.3.6 例題

次の2次システムを考える。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (1+r_1)x_1 + (1+r_2)x_2 + (1+s)u \end{cases}$$

これは、パラメータ変動 r_1, r_2, s ($|r_1| \leq 1.0, |r_2| \leq 1.0, |s| \leq 0.5$) をもつ線形な振動、減衰システムである。これまでに説明した制御則を適用したときのブロック線図を Fig.3.5 に示す。初期値を $x_1(0) = 0.5, x_2(0) = 0$ 、目標値を $x_1 = 0.0$ とし、パラメータ変動の最大値を与えたときのシミュレーション結果を Fig.3.6, Fig.3.7 に示す。Fig.3.6 は仮想目標値を適用しない場合、Fig.3.7 は適用した場合である。仮想目標値を適用したことで、チャタリングが著しく低減化していることがわかる。

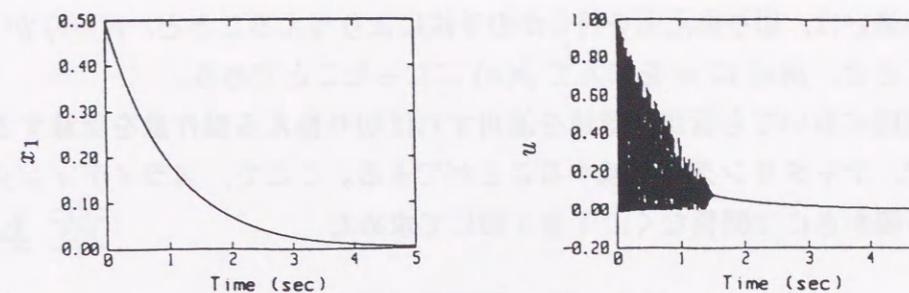


Fig.3.6 Responses due to Leitmann and others.

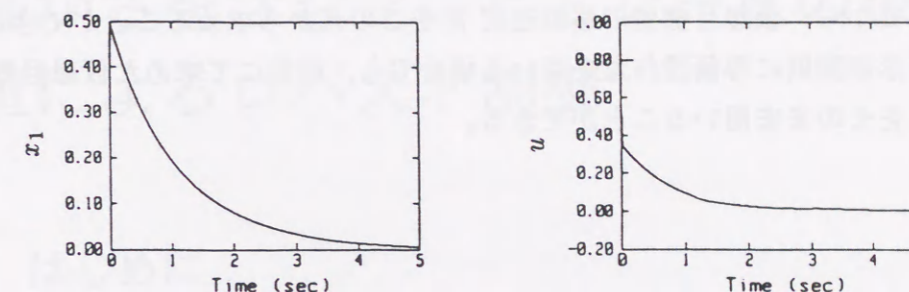


Fig.3.7 Responses of authors's control law with FSP.

3.4 不確定システムに対する可変構造制御則への適用

前節では、線形制御則に状態フィードバック則を用いる制御則に、仮想目標値を適用した場合である。この節では、線形制御則に等価操作量を用いる制御則に、仮想目標値を適用する。すなわち、不確定線形システムに対する可変構造制御則に仮想目標値を適用する。

対象とするシステムは、これまでのものと同一とするので省略する。まず、切り換え面を与える。

$$\sigma(x(t)) = Sx = 0 \tag{3.22}$$

そして、スライディングモードを実現する操作量は、

$$u(t) = K_{eq}x(t) + p(x(t)), \begin{cases} K_{eq} = -[SB]^{-1}SA \\ p(x) = -\text{sgn}(\sigma(x))\hat{\rho}(x), \quad \dot{\rho}(x) = \rho(x) + \alpha \end{cases} \tag{3.23}$$

である。 $K_{eq}x(t)$ は等価操作量、 $p(x)$ は状態を切り換え面 (3.22) 式に到達させるためと、同時に不確かさを補償する非線形な操作量である。 $\rho(x)$ はマッチング条件により不確かさを一括したものである。これは、(3.17) 式と同じである。 α は任意の正の定数であり、不確かさが零のときに、すなわち $\rho(x) = 0$ のときにスライディングモードを保証するための切り換えゲインである。なお、 α は関数など様々なものが提案されている [187]。

前節との違いは、切り換え面を何らかの手法により与えることと、 $Kx(t)$ が $K_{eq}x(t)$ になったことと、 $\rho(x)$ に α を加えて $\hat{\rho}(x)$ になったことである。

この制御則においても仮想目標値を適用すれば切り換える操作量を低減することができるので、チャタリングを低減することができる。ここで、スライディングモード方程式は不確かさには関係なく、1章4節にて求めた

$$\dot{x}(t) = [I - B(SB)^{-1}S]Ax(t) \quad (3.24)$$

と同一であるから、仮想目標値の移動速度 β をこの式から求めることができる。

結局、線形制御則に等価操作量を用いる場合でも、前節にて求めた仮想目標値のアルゴリズムをそのまま用いることができる。

3.5 まとめ

この章では、仮想目標値の新しいアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、線形フィードバック則と切り換え操作量とによって構成される Leitmann らによる制御則と、等価操作量と切り換え操作量から構成される不確定線形システムに対する可変構造制御則の両方に適用できることを示した。以下の章においては、具体的に仮想目標値が可変構造制御則にも有効であることを示す。

第4章

不確かさを含むマニピュレータの仮想目標値によるロバスト制御

4.1 はじめに

ロボットマニピュレータに不確かさが存在してもアームの先端を目標値に正確に到達させたり、目標軌道に追従させるロバストな制御則の研究が盛んに報告されている。これらのうち可変構造制御則と Leitmann らの制御則の手法を展開した研究が多い。(文献については1章を参照のこと)

ところで、これらの研究のほとんどは慣性行列の逆行列を求める必要がある。すなわち、マニピュレータの基本的な運動方程式は次のように表される。

$$M\ddot{\Theta} + B(\Theta, \dot{\Theta}) = U \quad (4.1)$$

Θ は各関節の角度、 U は各関節のトルク、 M は慣性行列、 B は遠心力、コリオリ力を表す。一般に制御則を求めるためには、この式を

$$\ddot{\Theta} = M^{-1}[U - B(\Theta, \dot{\Theta})] \quad (4.2)$$

に変形する必要がある。

一方、この様な慣性行列を求めずに制御則を求める手法が提案されている [235] [241] [244]。文献 [235] は定値制御であり、この手法を追従制御問題に展開した研究が文献 [241] [244] である。制御対象をマニピュレータに限定するならば、これらの手法によれば、前者のように慣性行列の逆行列を求める手法に比べて容易に制御則を構成することができる。

ところが、1章において述べたように、実際の制御においては、制御則をデジタル計算機により実行することがほとんどであり、その演算時間遅れによりチャタリン

グを生じる。さらに不確かさが大きい程、制御則の中の切り換える操作量が大きくなり、チャタリングを増大させることになる。この他にも切り換え遅れの原因としてアクチュエータの遅れなども考えられる。

一般にはこのチャタリングを避けるために、理論的に求めた制御則の中で使われている sgn 関数を次の飽和関数に置き換えて実行する。

$$\text{sat}(\sigma/\epsilon) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & (|\sigma| > \epsilon) \\ \sigma/\epsilon & (|\sigma| \leq \epsilon) \end{cases} \quad (4.3)$$

すでに述べたように、この関数を用いると $|\sigma| \leq \epsilon$ においては制御則が比例制御則になるために、 ϵ を大きくすると切り換え面に対して定常偏差を残す。その結果、目標値に対しても定常偏差を生じることになる。したがって、定常偏差の大きさとチャタリング低減化の相反する要求を考慮する必要がある。

そこで、この章では仮想目標値を適用した可変構造制御則を同様な手順により導出し、仮想目標値が可変構造制御則にも簡単に適用でき、その結果、切り換えゲインを低く抑えることによってチャタリングの著しい低減化を実現できることを示す。

4.2 2リンクマニピュレータ

Fig.4.1 に示すような水平面上を回転する2リンクマニピュレータの定値制御を考える。負荷の質量は一定ではなく、必要に応じて様々な負荷を動かすことを想定する。ただし、その最大値だけは既知とする。このシステムの運動方程式は次のように表わされる。

$$[M + \Delta M(\Theta)]\ddot{\Theta} + B(\Theta, \dot{\Theta}) + D\dot{\Theta} = U \quad (4.4)$$

ここで、状態点 $\Theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ 、操作量 $U = [u_1, u_2]^T$ 、

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad \Delta M(\Theta) = \begin{bmatrix} \Delta m_{11} & \Delta m_{12} \\ \Delta m_{21} & \Delta m_{22} \end{bmatrix},$$

$$B(\Theta, \dot{\Theta}) = [b_1, b_2]^T, \quad D = \text{diag}[d_1, d_2],$$

$$m_{11} = J_1 + J_2 + m_1 r_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 r_2^2$$

$$m_{12} = J_2 + m_2 r_2^2, \quad m_{21} = m_{12}, \quad m_{22} = J_2 + m_2 r_2^2$$

$$\Delta m_{11} = 2m_2 l_1 r_2 \cos \theta_2 + J_L + m_L(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2)$$

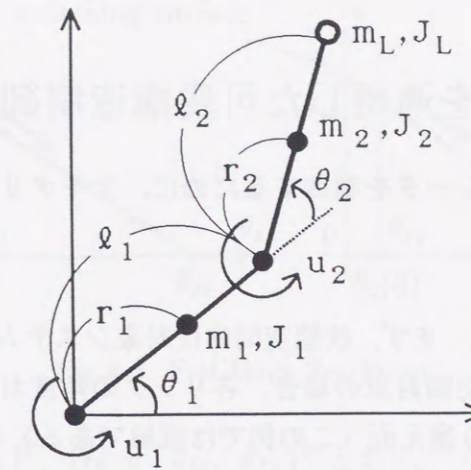


Fig.4.1 A two-link manipulator on a horizontal plane.

Table.4.1 Parameters of Two-link manipulator.

l_1	0.5	[m]	J_1	0.42	[kgm ²]
l_2	0.5	[m]	J_2	0.083	[kgm ²]
r_1	0.33	[m]	m_1	3.0	[kg]
r_2	0.25	[m]	m_2	1.0	[kg]
$d_1 \text{ max}$	0.5	[Nms/rad]	$J_L \text{ max}$	0.05	[kgm ²]
$d_2 \text{ max}$	0.3	[Nms/rad]	$m_L \text{ max}$	0.2	[kg]

$$\Delta m_{12} = m_2 l_1 r_2 \cos \theta_2 + J_L + m_L(l_2^2 + l_1 l_2 \cos \theta_2)$$

$$\Delta m_{21} = \Delta m_{12}, \quad \Delta m_{22} = J_L + m_L l_2^2$$

$$b_1 = -(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 - 2(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$b_2 = (m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2$$

$[M + \Delta M]$ は慣性行列、 ΔM は負荷変動と非線形な関数をもつパラメータをまとめたものである。 B は遠心力、コリオリ力を表わす。 D は粘性摩擦係数行列であり、その最大値のみが既知とする。

添え字を省略するが、 J はリンクの慣性モーメント、 m 、 l はそれぞれリンクの質量と長さ、 r は関節からリンクの重心までの距離、 m_L は負荷質量、 J_L はその慣性モーメントである。それぞれの値を Table.4.1 に示す。

4.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則

前節に示したマニピュレータを制御するために、チャタリングを低減する可変構造制御則を構成する。

(1) 切り換え面の設計 まず、状態空間内に対象システムの状態を拘束すべき切り換え面を設計する。この制御対象の場合、各リンクの角度およびその角速度の2変数1組に対してひとつの切り換え面（この例では直線である）を与える（Fig.4.2 参照）。可変構造制御則は、各関節の状態点をそれぞれの切り換え面に拘束し、拘束したまま目標値まで滑らせる。

今、Fig.4.2 の切り換え面を次のように与える。

$$S(\Theta - \Theta_d) + \dot{\Theta} = 0, \quad \text{ただし、} S = \text{diag}[s_1, s_2], \quad \Theta_d = [\theta_{d1}, \theta_{d2}]^T \quad (4.5)$$

Θ_d は目標角度である。 s_1, s_2 は正の定数であり、その選び方については多くの研究があるが、例えば、文献 [226] では、 $-s_1, -s_2$ を各リンクの所要の応答を示す固有値としている。

(2) 仮想目標値の構成 次に仮想目標値を構成する。この例では Fig.4.3 に示すように仮想目標値を各リンクに対し、 θ_{f1}, θ_{f2} と1個ずつ設定する。真の目標角度 θ_{d1}, θ_{d2} に対して、それぞれ次のようにおくことができる。

$$\begin{aligned} \theta_{f1}(t) &= (\theta_1(0) - \theta_{d1}) \cdot e^{-s_1 t} + \theta_{d1} \\ \theta_{f2}(t) &= (\theta_2(0) - \theta_{d2}) \cdot e^{-s_2 t} + \theta_{d2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

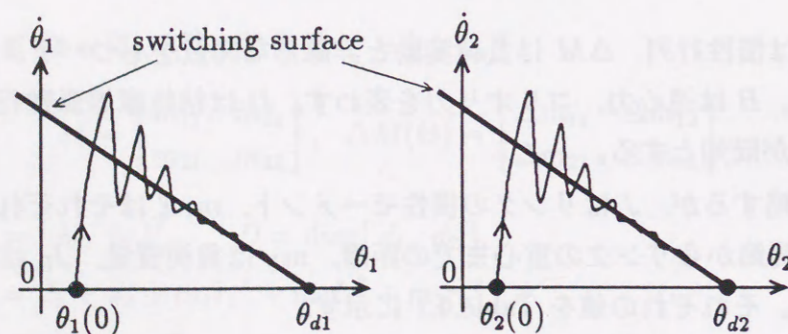


Fig.4.2 Switching surface.

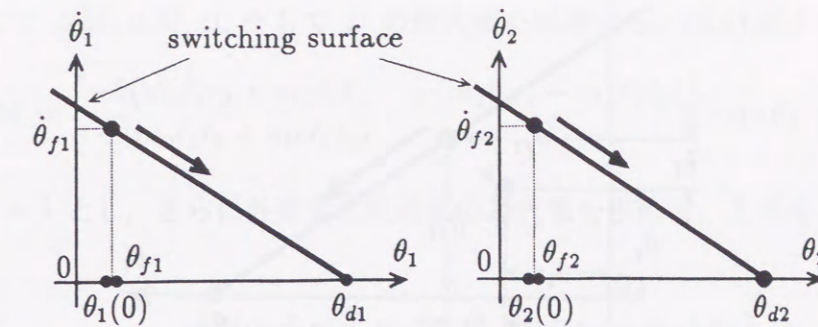


Fig.4.3 Fictitious Set Point.

ここで、 $\Theta_F = [\theta_{f1}, \theta_{f2}]^T$, $\dot{\Theta}_F = [\dot{\theta}_{f1}, \dot{\theta}_{f2}]^T$ とおく。なお、 $\theta_1(0), \theta_2(0)$ は制御開始時の状態点の初期位置である。また、仮想目標値による仮想的な角速度は、

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{f1}(t) &= -s_1(\theta_{f1}(t) - \theta_{d1}) \\ \dot{\theta}_{f2}(t) &= -s_2(\theta_{f2}(t) - \theta_{d2}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

となる。

そして、状態点の仮想目標値 Θ_F からの偏差を (Fig.4.4 参照)

$$e_1 = \theta_1 - \theta_{f1}, \quad e_2 = \theta_2 - \theta_{f2} \quad (4.8)$$

とおくと、

$$\dot{e}_1 = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{f1}, \quad \dot{e}_2 = \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{f2} \quad (4.9)$$

を得る。また、 $E_\Theta = [e_1, e_2]^T$, $\dot{E}_\Theta = [\dot{e}_1, \dot{e}_2]^T$ とおいて (4.8) 式、(4.9) 式を書き改めると、

$$E_\Theta = \Theta - \Theta_F, \quad \dot{E}_\Theta = \dot{\Theta} - \dot{\Theta}_F \quad (4.10)$$

となる。

このように仮想目標値は、切り換え面を決定すれば簡単に実現することができる。

(3) 可変構造制御則の導出 この節では、前述の仮想目標値からの仮想的な偏差を用いる可変構造制御則を求める。いま、状態点が切り換え面上にない時を考えて切り換え関数 σ を次のようにおく。

$$\sigma = \sigma(\Theta, \dot{\Theta}) = S(\Theta - \Theta_d) + \dot{\Theta}, \quad \sigma = [\sigma_1, \sigma_2]^T \quad (4.11)$$

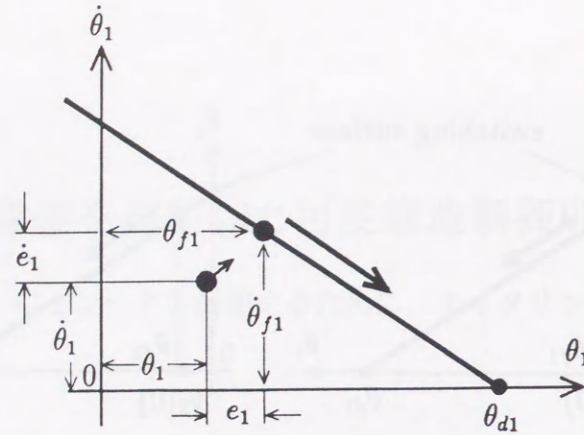


Fig.4.4 Fictitious deviation.

次に提案する制御則が、状態点を切り換え面 (4.5) 式に拘束することを保証するために Lyapunov 関数の候補として、

$$V(\Theta) = (1/2)\sigma^T [M + \Delta M(\Theta)] \sigma \quad (4.12)$$

を考える。なお、以後 $V(\Theta), \Delta M(\Theta)$ の Θ を省略する。(4.12) 式の導関数は、

$$\dot{V} = (1/2)\sigma^T [\dot{M} + \dot{\Delta M}] \sigma + \sigma^T [M + \Delta M] \dot{\sigma} \quad (4.13)$$

となる。(4.13) 式の右辺の第 2 項の括弧を書き改めるために、まず (4.11) 式を微分し、

$$\dot{\sigma} = S\dot{\Theta} + \ddot{\Theta} \quad (4.14)$$

次に、(4.14) 式に左から $[M + \Delta M]$ をかけ、

$$[M + \Delta M] \dot{\sigma} = [M + \Delta M] S\dot{\Theta} + [M + \Delta M] \ddot{\Theta} \quad (4.15)$$

とする。さらに、(4.15) 式の右辺の $\ddot{\Theta}$ の項を他の変数によって表わすために、(4.4) 式から、

$$[M + \Delta M] \ddot{\Theta} = -B(\Theta, \dot{\Theta}) - D\dot{\Theta} + U \quad (4.16)$$

(4.16) 式を (4.15) 式に代入して、

$$[M + \Delta M] \dot{\sigma} = [M + \Delta M] S\dot{\Theta} - B(\Theta, \dot{\Theta}) - D\dot{\Theta} + U \quad (4.17)$$

ここで (4.17) 式を (4.13) 式の第 2 項に代入し、さらに (4.4) 式の M の各要素は定数であるから $\dot{M} = 0$ より、

$$\dot{V} = \sigma^T M S \dot{\Theta} + \sigma^T \{ (1/2) \Delta \dot{M} \sigma + \Delta M S \dot{\Theta} - B(\Theta, \dot{\Theta}) - D\dot{\Theta} \} + \sigma^T U \quad (4.18)$$

となる。ここで $\Delta \dot{M}, \Delta M, B$, そして D の最大値を考慮する。(4.4) 式より、

$$\Delta \dot{M} = \begin{bmatrix} -2(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) & -(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \\ -(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) & 0 \end{bmatrix} \cdot \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2$$

最大値 $\sin \theta_2 = 1$ とし、さらに各要素の絶対値の最大値を求めて、上式を $\Delta \dot{M}_{\max} \cdot |\dot{\theta}_2|$ とおけば、

$$\Delta \dot{M}_{\max} = \begin{bmatrix} 2(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) & m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2 \\ m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2 & 0 \end{bmatrix}$$

同様にして、 $\Delta M, B, D$ の各最大値を考えて $\cos \theta_2 = 1, \sin \theta_2 = 1$ とし、それぞれを $\Delta M_{\max}, B(|\dot{\Theta}|)_{\max}, D_{\max}$ とおく。

$$\Delta M_{\max} = \begin{bmatrix} 2m_2 l_1 r_2 + J_L & m_2 l_1 r_2 + J_L \\ +m_L(l_1 + l_2)^2 & +m_L(l_2^2 + l_1 l_2) \\ m_2 l_1 r_2 + J_L & J_L + m_L l_2^2 \\ +m_L(l_2^2 + l_1 l_2) & \end{bmatrix},$$

$$B(|\dot{\Theta}|)_{\max} = \begin{bmatrix} (m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \dot{\theta}_2^2 \\ + 2(m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) |\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2| \\ (m_2 l_1 r_2 + m_L l_1 l_2) \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix},$$

$$D_{\max} = \text{diag}[d_1, d_2]$$

ここで J_L, m_L, d_1, d_2 は最大値をとる。これらの関係を用いて (4.18) 式をさらに変形すれば、

$$\dot{V} \leq \sigma^T M S \dot{\Theta} + \sigma^T \{ (|\dot{\theta}_2|/2) \Delta \dot{M}_{\max} \sigma + \Delta M_{\max} S |\dot{\Theta}| + B(|\dot{\Theta}|)_{\max} + D_{\max} |\dot{\Theta}| \} + \sigma^T U \quad (4.19)$$

となる。ここでベクトルの絶対値記号は、各要素の絶対値をとるものとする。(以下同様) に用いる)

次に、不確かさや非線形性を切り換えゲインにより構成される非線形制御則 (上式の $\{ \}$) にて補償し、その他の部分を線形制御則 (上式の第 1 項および切り換え面に到達させる制御則) にて制御することを考えて、操作量 U を次のようにおく。

$$U = -M S \dot{\Theta} - K \sigma + P(\sigma, \dot{E}_\Theta), \quad \begin{cases} K = \text{diag}[k_1, k_2] \\ P(\sigma, \dot{E}_\Theta) = -\text{sgn}(\sigma) \cdot \rho(\sigma, \dot{E}_\Theta) \end{cases} \quad (4.20)$$

ここで $\rho(\sigma, \dot{E}_\Theta)$ は切り換えゲインであり、これを

$$\rho(\sigma, \dot{E}_\Theta) \geq (|\dot{e}_2|/2)\Delta\dot{M}_{\max}|\sigma| + \Delta M_{\max}S|\dot{E}_\Theta| + B(|\dot{E}_\Theta|)_{\max} + D_{\max}|\dot{E}_\Theta| \quad (4.21)$$

とおく。ただし、上の操作量 U の第1項は不確かさおよび非線形性を零とおいたシステムを制御するための線形制御則であり、 K は任意の正の定数である。 K の値を大きく選ぶ程、対象システムの状態点が切り換え面に到達するまでの応答が速くなるが、実際の適用においては許されるトルクの最大値などを考慮してシミュレーションなどにより決めればよい。また、 $P(\sigma, \dot{E}_\Theta)$ は不確かさおよび非線形性を補償するための非線形制御則であり、その切り換えゲイン $\rho(\sigma, \dot{E}_\Theta)$ は仮想目標値からの仮想的な偏差により求める。ここで、もし、仮想目標値を適用しなければ、仮想的な偏差 \dot{E}_Θ を用いずに

$$\rho(\sigma, \dot{\Theta}) \geq (|\dot{\theta}_2|/2)\Delta\dot{M}_{\max}|\sigma| + \Delta M_{\max}S|\dot{\Theta}| + B(|\dot{\Theta}|)_{\max} + D_{\max}|\dot{\Theta}| \quad (4.22)$$

となる。ここで、不等号はベクトルの各要素についてとるものとする。

次に、この操作量 U を用いた場合に Lyapunov 導関数が負になることを示す。(4.17) 式を (4.19) 式に代入し、さらに (4.6), (4.7) 式の関係を用いて変形すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\sigma^T K \sigma + \sigma^T \{ (|\dot{e}_2 + \dot{\theta}_{f2}|/2)\Delta\dot{M}_{\max}\sigma + \Delta M_{\max}S|\dot{E}_\Theta + \dot{\Theta}_F| + B(|\dot{E}_\Theta + \dot{\Theta}_F|)_{\max} \\ &\quad + D_{\max}|\dot{E}_\Theta + \dot{\Theta}_F| + P(\sigma, \dot{E}_\Theta) \} \\ &\leq -\sigma^T K \sigma + \sigma^T \{ (|\dot{e}_2|/2)\Delta\dot{M}_{\max}\sigma + \Delta M_{\max}S|\dot{E}_\Theta| + B(|\dot{E}_\Theta|)_{\max} + D_{\max}|\dot{E}_\Theta| \\ &\quad + P(\sigma, \dot{E}_\Theta) \} + \sigma^T \{ (|\dot{\theta}_{f2}|/2)\Delta\dot{M}_{\max}\sigma + \Delta M_{\max}S|\dot{\Theta}_F| + B(|\dot{E}_\Theta \dot{\Theta}_F|, |\dot{\Theta}_F|)_{\max} \\ &\quad + D_{\max}|\dot{\Theta}_F| \} \end{aligned} \quad (4.23)$$

(4.20), (4.21) 式より上式において第2項 ≤ 0 である。そして第3項はすべて仮想目標値を含む項であり、仮想目標値は制御対象の状態とは関係なく (4.6), (4.7) 式によって真の目標値まで移動し、最終的にその速度は零になる。つまり第3項 $= 0$ になる。この条件を満たすまでは、仮想目標値の移動速度を、状態点が切り換え面に拘束された後の状態点の理想的な減衰速度 ($e^{-s_1 t}$, $e^{-s_2 t}$) に等しくおく。従って、仮想目標値は状態点に先行しつつ真の目標値に到達することになる。よって、

$$\dot{V} \leq -\sigma^T K \sigma \quad (4.24)$$

が成り立つといえる。

Fig.4.5 にこの制御系のブロック線図を示す。

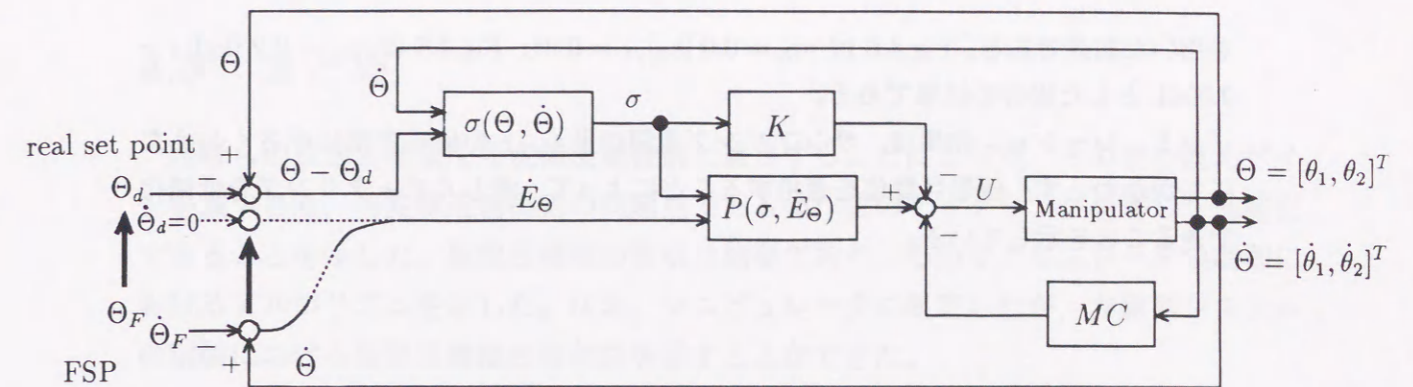


Fig.4.5 Block diagram of manipulator control system.

4.4 シミュレーション結果

4.4.1 定値制御の場合

4.2 節に示したマニピュレータの定値制御のシミュレーションを行い、4.3 節に示した可変構造制御則が仮想目標値を適用すれば著しくチャタリングが低減化することを示す。シミュレーション条件として、初期位置を $\theta_1(0) = 0.0$ [rad], $\theta_2(0) = 0.0$ [rad], 目標角度を $\theta_{d1} = 1.0$ [rad], $\theta_{d2} = 1.5$ [rad] とした。負荷を $m_L = 0.0$ [kg] と $m_L = 0.2$ [kg] の場合を仮定し、 d_1, d_2 [Nms/rad] は次式のように仮定した。

$$d_1(t) = 0.2 + 0.3 \cdot e^{-1.2t}, \quad d_2(t) = 0.2 + 0.1 \cdot e^{-1.0t}$$

なお、切り換え面の傾きは $s_1 = 1$, $s_2 = 1$ とし、 $k_1 = 5$, $k_2 = 1$ を与え、サンプリング周期を 0.01 [sec] とした。

また、4.1 節に述べたように sgn 関数は不連続関数であるため、これを近似した sat 関数を用いた。

$$\text{sat}(\sigma/\epsilon) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & |\sigma| > \epsilon \\ \sigma/\epsilon & |\sigma| \leq \epsilon \end{cases}$$

シミュレーション結果を Fig.4.6, 4.7 に示す。(a) は仮想目標値を適用しない場合であり、(4.22) 式を用いて操作量を求めた結果である。(b) は仮想目標値を適用し、(4.21) 式

を用いた結果である。Fig.4.6 は $m_L = 0.0$ [kg], $\epsilon = 0.01$, Fig.4.7 は $m_L = 0.2$ [kg], $\epsilon = 0.0001$ とした場合の結果である。

シミュレーション結果は、サンプリング周期が長く、 ϵ の値を非常に小さく与えたにもかかわらず、仮想目標値を適用することによって、著しくチャタリングを低減化できることを示している。

4.4.2 追従制御の場合

これまでに示した式のうち、2式を書き換えるだけで簡単に追従制御問題に対処することができる。まず、目標軌道から逆算した各リンクの目標角度を $\Theta_d = [\theta_{d1}(t), \theta_{d2}(t)]^T$ とし、(4.5) 式に示した切り換え面を

$$S(\Theta - \Theta_d) + (\Theta - \dot{\Theta}_d) = 0 \quad (4.25)$$

とする。次に、(4.7) 式を

$$\dot{\theta}_{f1}(t) = -s_1(\theta_{f1}(t) - \theta_{d1}(t)) + \dot{\theta}_{d1}(t) \quad (4.26)$$

$$\dot{\theta}_{f2}(t) = -s_2(\theta_{f2}(t) - \theta_{d2}(t)) + \dot{\theta}_{d2}(t) \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

とする。この他の式に変更はなく、仮想目標値を適用した際に Lyapunov 導関数が負になることも同様に成立する。

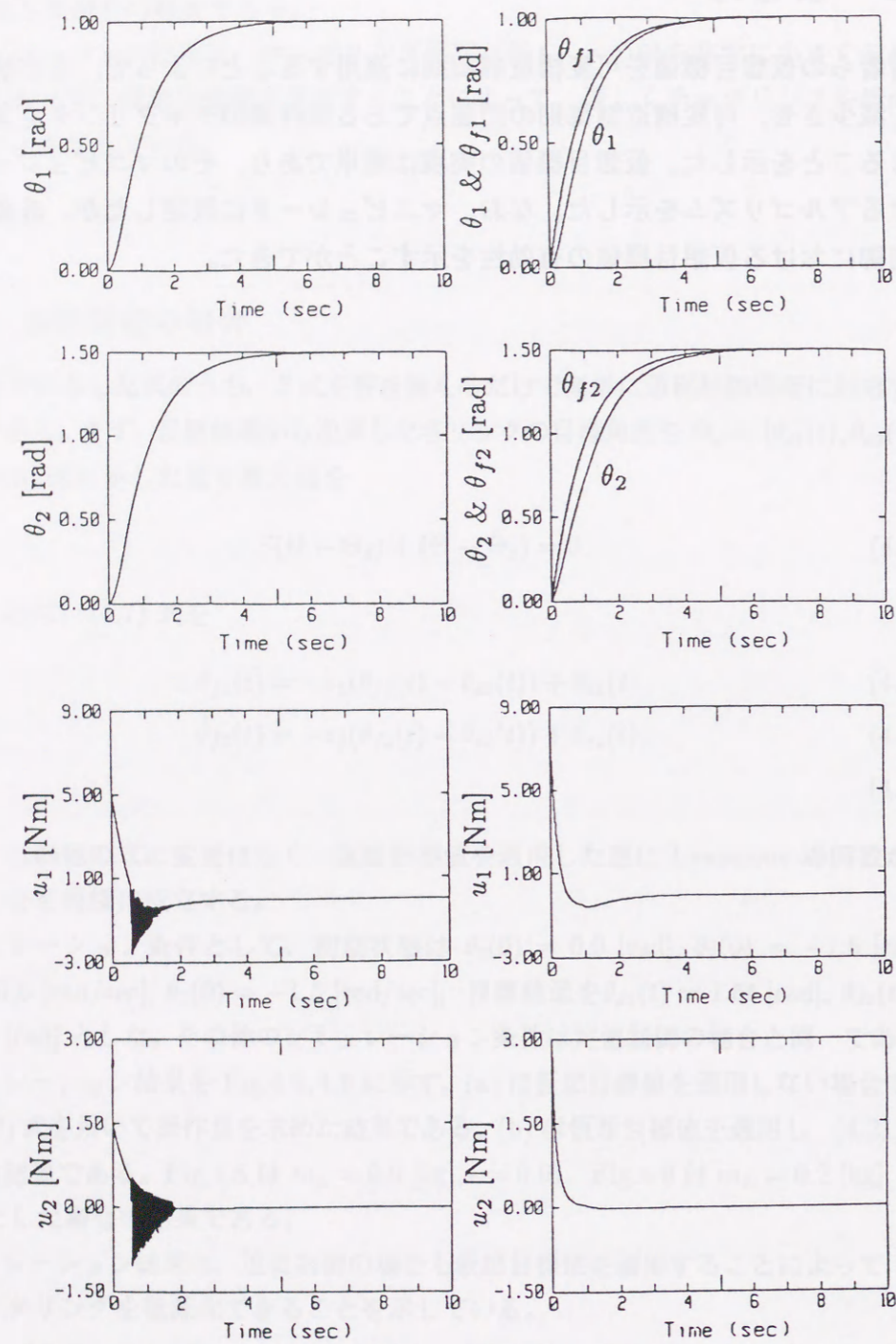
シミュレーション条件として、初期状態は $\theta_1(0) = 0.0$ [rad], $\theta_2(0) = -1.5$ [rad], $\dot{\theta}_1(0) = 0.0$ [rad/sec], $\dot{\theta}_2(0) = -1.5$ [rad/sec], 目標軌道を $\theta_{d1}(t) = 1.5t$ [rad], $\theta_{d2}(t) = 0.5\sin(t)$ [rad] とした。その他のシミュレーション条件は定値制御の場合と同一である。

シミュレーション結果を Fig.4.8, 4.9 に示す。(a) は仮想目標値を適用しない場合であり、(4.22) 式を用いて操作量を求めた結果である。(b) は仮想目標値を適用し、(4.21) 式を用いた結果である。Fig.4.8 は $m_L = 0.0$ [kg], $\epsilon = 0.01$, Fig.4.9 は $m_L = 0.2$ [kg], $\epsilon = 0.0001$ とした場合の結果である。

シミュレーション結果は、追従制御の場合も仮想目標値を適用することによって、著しくチャタリングを低減化できることを示している。

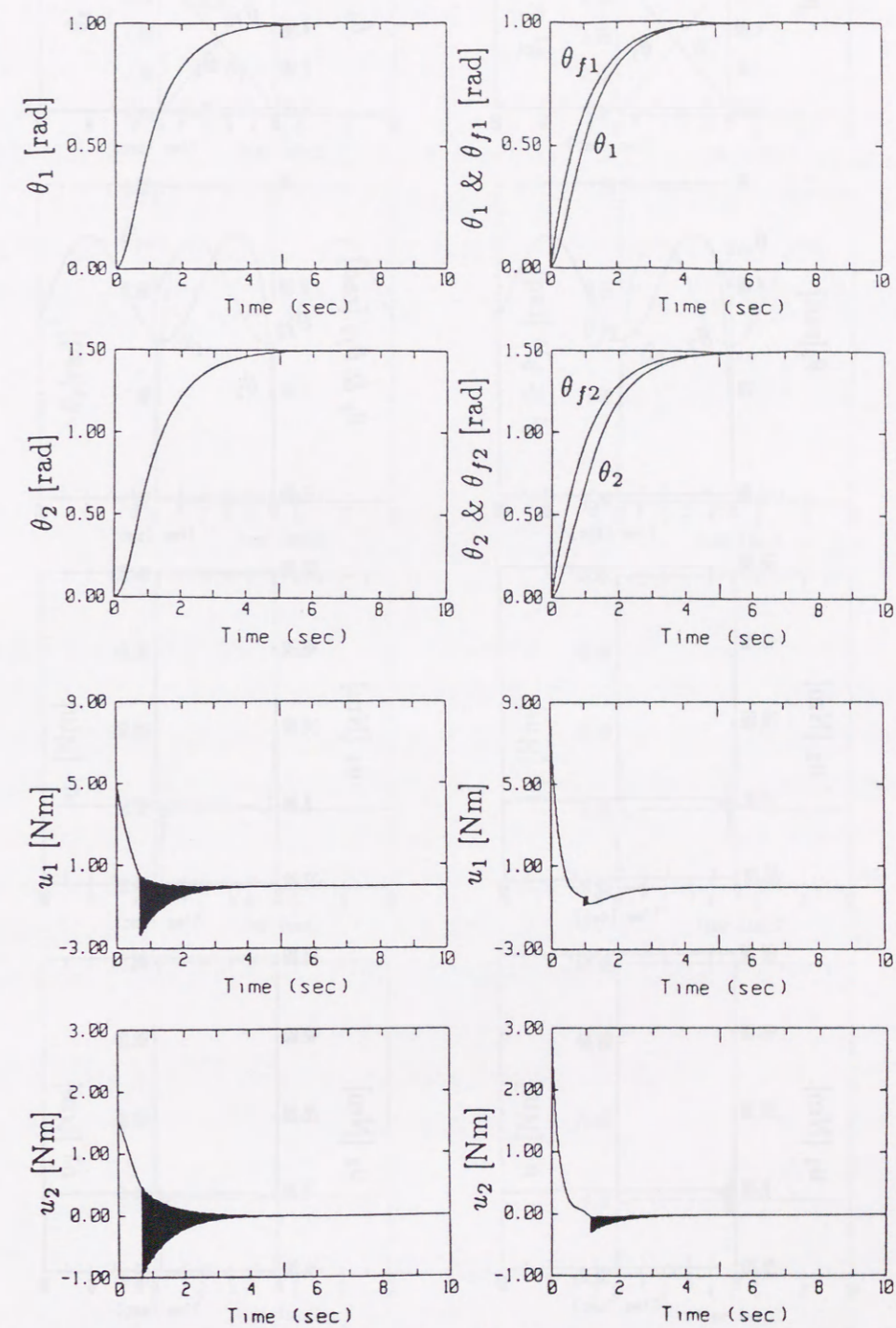
4.5 まとめ

著者らの仮想目標値を変換構造制御則に適用することによって、その切り換えゲインを減少させ、可変構造制御則の問題点である操作量のチャタリングを著しく低減化できることを示した。仮想目標値の実現は簡単であり、そのマニピュレータの制御におけるアルゴリズムを示した。なお、マニピュレータに限定したが、非線形システムの制御における仮想目標値の有効性を示すことができた。



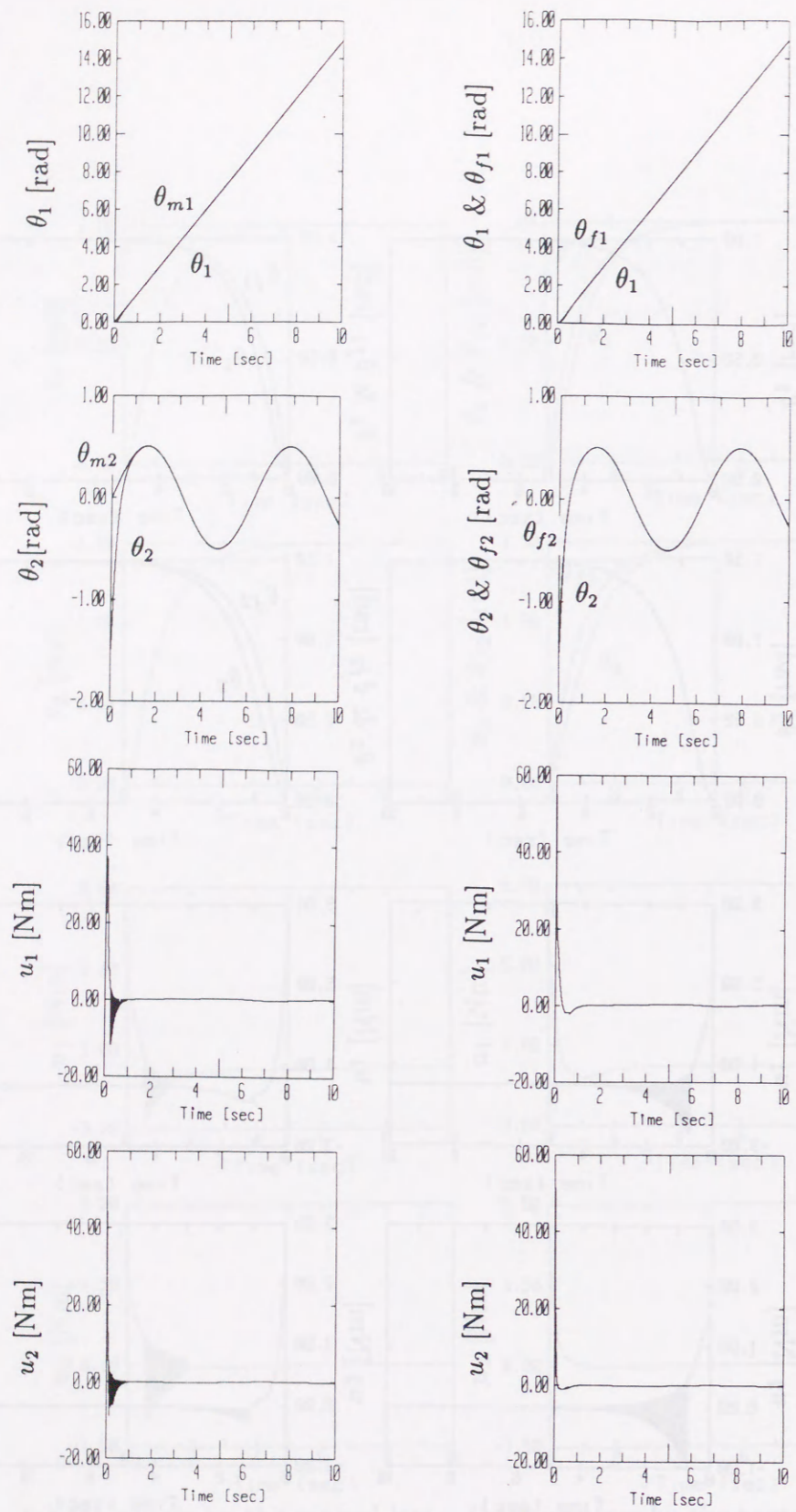
(a) Responses by the control law (by eq.4.22) without FSP. (b) Responses by the control law (by eq.4.21) with FSP.

Fig.4.6 A case of constant desired value control. ($m_L = 0.0[\text{Kg}], \epsilon = 0.01.$)



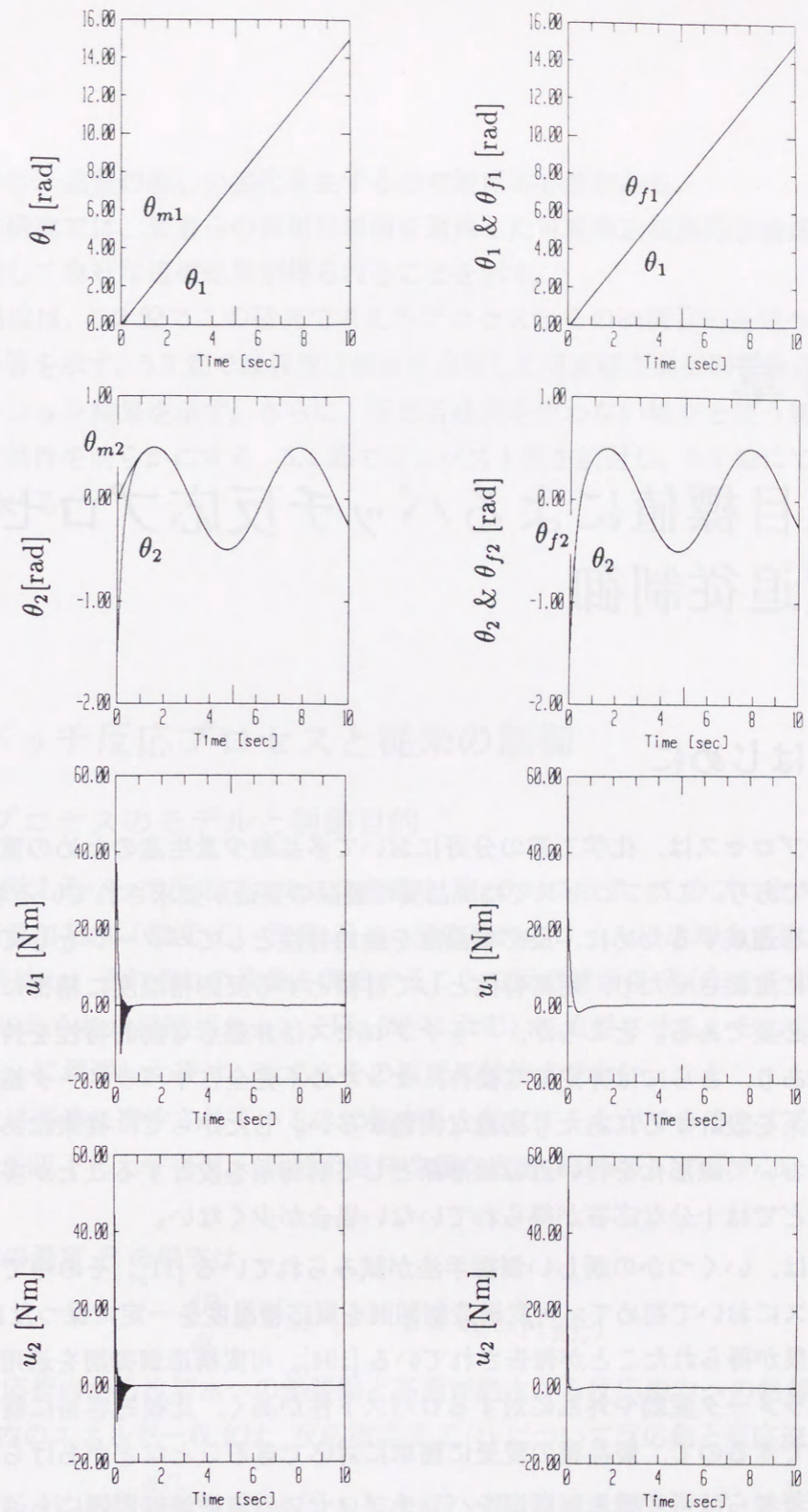
(a) Responses by the control law (by eq.4.22) without FSP. (b) Responses by the control law (by eq.4.21) with FSP.

Fig.4.7 A case of constant desired value control. ($m_L = 0.2[\text{Kg}], \epsilon = 0.0001.$)



(a) Responses by the control law (by eq.4.22) without FSP. (b) Responses by the control law (by eq.4.21) with FSP.

Fig.4.8 A case of tracking control. ($m_L = 0.0$ [Kg], $\epsilon = 0.01$.)



(a) Responses by the control law (by eq.4.22) without FSP. (b) Responses by the control law (by eq.4.21) with FSP.

Fig.4.9 A case of tracking control. ($m_L = 0.2$ [Kg], $\epsilon = 0.0001$.)

第 5 章

仮想目標値によるバッチ反応プロセスの温度追従制御

5.1 はじめに

バッチプロセスは、化学工業の分野において多品種少量生産のための重要な生産形態の一つであり、このプロセスでは高品質な製品の製造が要求されている場合が多い。その要求を達成するために、反応槽温度を動的特性としてパターンとして与えられる目標軌道に追従させたり、定常特性として目標とする反応槽温度に精密に維持することなどが必要である。ところが、バッチプロセスは非線形な動的特性を持つことがほとんどであり、さらには非定常な操作、センサの不完全さやパラメータ推定の難しさなど制御系を設計するにあたり困難な問題が多い。したがって、従来はある動作点近傍などにおいて線形化を行い近似線形系として制御系を設計することが多いが、PID制御などでは十分な応答が得られていない場合が少なくない。

最近では、いくつかの新しい制御手法が試みられている [11]。その中で、実際の化学プロセスにおいて初めて、可変構造制御則を反応槽温度を一定に保つために適用し、良好な結果が得られたことが報告されている [194]。可変構造制御則を適用する利点として、パラメータ変動や外乱に対するロバスト性が高く、比較的容易に制御則を求めることができるので、製品種の変更に対応できることなどがあげられる。

さて、著者らは可変構造制御則をバッチプロセスの追従制御問題にも適用することを検討した。この研究のプロセスでは効率よく反応を進めるために、反応槽温度を所要の反応槽温度に保つだけでなく、反応開始時より、その反応槽温度まで一定速度で上昇させる必要がある。このような追従制御問題に対し、従来一般的な可変構造制御則を用いると、反応槽温度に対して行き過ぎを起こすことがわかった。この温度

の行き過ぎは、品質の著しい劣化を生ずるので避ける必要がある。

そこで本研究では、著者らの仮想目標値を適用した可変構造制御則を構成し、この問題を解決して良好な追従結果が得られることを示す。

本章の構成は、5.2 節でこの研究で考えるプロセスとその制御目的を述べ、PI制御による応答を示す。5.3 節では仮想目標値を適用した可変構造制御則を構成し、そのシミュレーション結果を示す。さらに、仮想目標値を使わない場合と使う場合を比較してその有効性を明らかにする。5.4 節ではロバスト性を検討し、5.5 節にてこの章のまとめを述べる。

5.2 バッチ反応プロセスと従来の制御

5.2.1 プロセスのモデルと制御目的

本研究で考えるバッチ反応プロセスの概略を Fig.5.1 に示す。このプロセスは、ジャケットに高温加熱水（温度 T_b 、流量 F_b ）、反応槽内のコイルに冷却水（温度 T_c 、流量 F_c ）を供給し、それぞれの流量を調節することで反応槽温度 $T_r(t)$ をその初期温度 $T_r(0)$ から与えられた温度パターン（Fig.5.2 に示す）に追従させる。そして所要の反応槽温度 T_{rd} に到達した後は、直ちにその温度に維持させたい。

反応槽内は高速に攪拌されているので集中系と見なすことができるとする。この動特性モデルを以下に示す [15]。（記号の意味や値などを Table.5.1 に示す。）

反応槽内の濃度 P の収支は、

$$\frac{dP}{dt} = -kP^3, \quad k = k_\infty \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) \quad (5.1)$$

となる。反応槽内から冷却水への熱移動と高温加熱水から反応槽内への熱移動を考えて、反応槽内のエネルギー収支は、反応槽温度 $T_r(t)$ について反応熱と反応速度式から

$$V_r \rho_r C_r \frac{dT_r}{dt} = QV_r k P^3 + k_j A_j (T_b - T_r) - k_c A_c (T_r - T_c) \quad (5.2)$$

となる。ジャケット内の高温加熱水のエネルギー収支は、高温加熱水の供給、およびジャケット内より反応槽への熱移動などから、高温加熱水温度 T_b については

$$V_j \rho_b C_b \frac{dT_b}{dt} = F_b \rho_b C_b (T_{bi} - T_b) - k_j A_j (T_b - T_r) \quad (5.3)$$

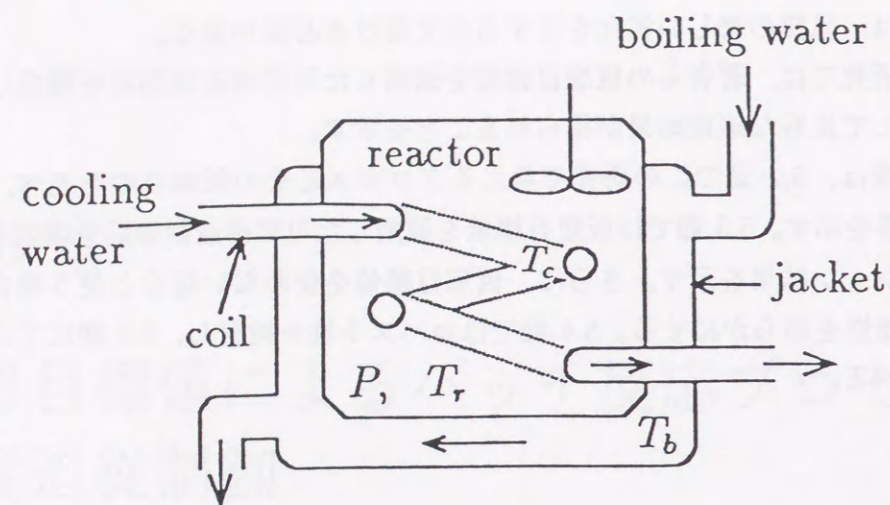


Fig.5.1 Batch reactor process.

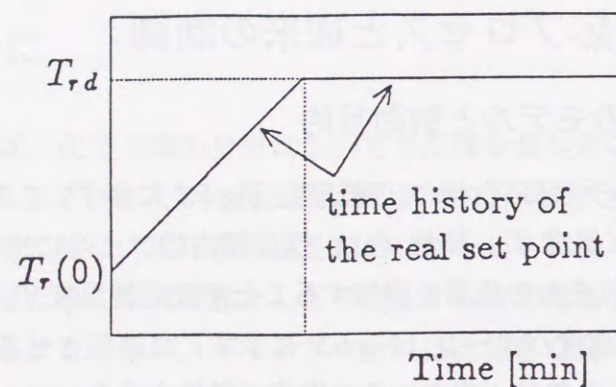


Fig.5.2 Tracking pattern of the temperature.

となる。コイル内の冷却水のエネルギー収支は、冷却水の供給、および反応槽よりコイル内への熱移動などから、冷却水温度 T_c については

$$V_c \rho_c C_c \frac{dT_c}{dt} = F_c \rho_c C_c (T_{ci} - T_c) + k_c A_c (T_r - T_c) \quad (5.4)$$

となる。

なお、反応槽内の検出端（熱電対と濃度計）は攪拌力と腐食から保護するために保護管に入れられており、そのために温度と濃度の検出には熱容量による時間遅れがある。(5.2)～(5.4)式では壁の厚さを考慮していないが、実際には壁内の熱伝導による遅れが存在し、さらには高温加熱水と冷却水の供給パイプの構造上、弁操作に対する若干のむだ時間が存在する。また、このプロセスでは必要上、制御動作は間欠的に行っている。これらの値については Table.5.2 に示す。

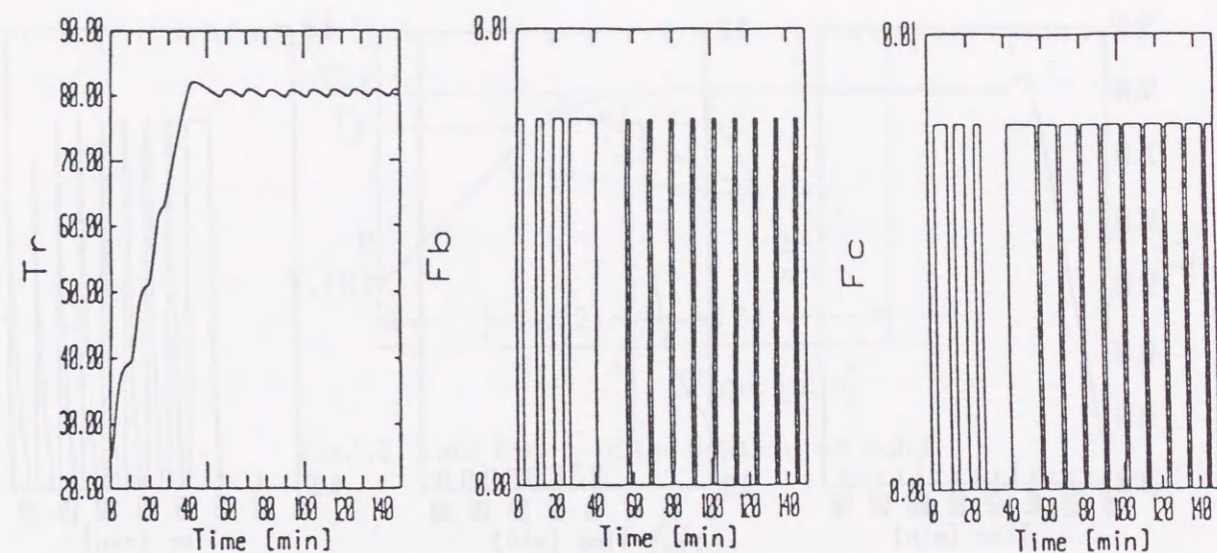


Fig.5.3 Simulation results by PI control.

5.2.2 従来のPI制御による応答

前節で述べたプロセスに、PI制御を適用してシミュレーションを行う。シミュレーションにおいて仮定した条件を Table.5.2 に示す。検出端の遅れは、これに壁の伝熱の遅れも含めて一次遅れとして近似し、その時定数は大きく見積もっている。PI制御の各パラメータは試行錯誤により求め、そのシミュレーション結果を Fig.5.3 に示す。PI制御によれば、操作全般において反応槽温度が振動していることがわかる。このプロセスの場合、問題になるのは温度上昇時の振動と、所要の反応槽温度 T_{rd} に到達した際の反応槽温度の行き過ぎである。特に、このときの行き過ぎは数度でも品質の著しい劣化を生ずるので、できるだけ抑える必要がある。

次章ではこれらの問題を解決するために、仮想目標値を適用した可変構造制御則による制御を考える。

5.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則による制御

5.3.1 従来の可変構造制御則について

まず、実在するシステムのための可変構造制御則の研究を調査したところ、力学系が多く [232] [177] [241] [243]、プロセス制御における例は少ない [162] [194] [219]。そ

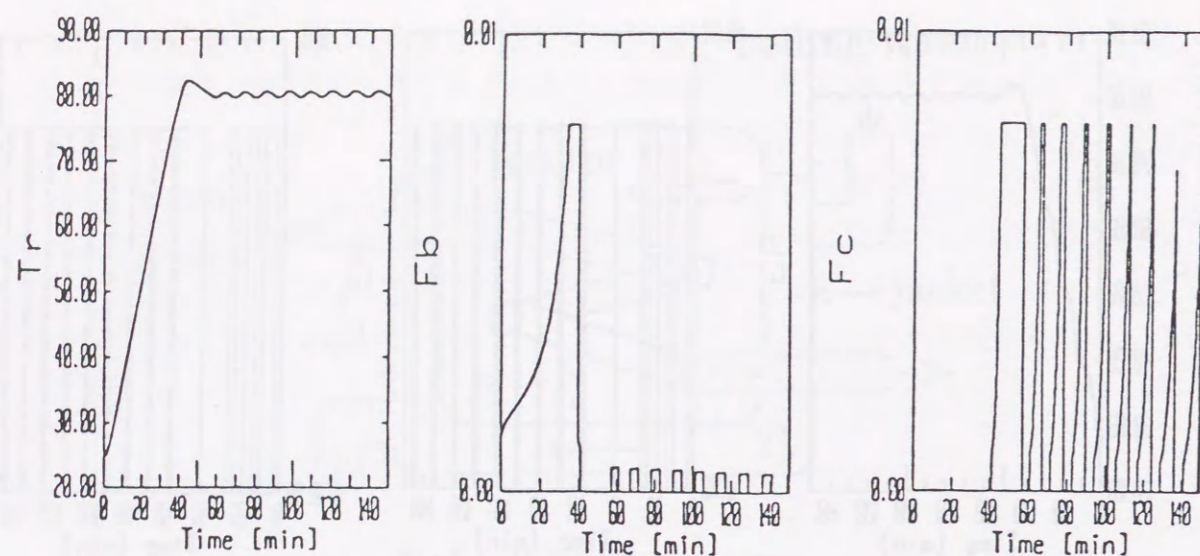


Fig.5.4 Simulation results by VSC without FSP.

して、それはいずれも定値制御であって、追従制御を行った研究は見当たらないようである。可変構造制御則による追従制御問題のための理論的な研究としては、文献 [227] [158] [241] [213] [221] がある。

さて、可変構造制御則では切り換え面 (σ とする) を与え、それからその切り換え面に制御対象の状態を拘束するための条件 (いわゆるスライディングモード条件 $\sigma \dot{\sigma} < 0$) から制御則を求める。そして、可変構造制御則は状態を切り換え面に拘束して目標値まで滑らせるものである。切り換え面に拘束された状態はパラメータ変動や外乱に対してロバストになる。追従制御問題のための可変構造制御則の従来の研究によれば、目標軌道を切り換え面として与え、制御量のその面からの偏差に応じて操作量を切り換える構成とする。

これらの研究に基づき、Fig.5.2 に示した温度パターンを切り換え面とし、可変構造制御則を導出して本研究のプロセスに適用したところ、反応槽温度の上昇時における追従性は P I 制御に比べて良い結果を得ることができたが、所要の反応槽温度 T_{rd} に到達した際の行き過ぎの問題については、逆に P I 制御よりも悪い結果を生ずることがわかった。そのシミュレーション結果を Fig.5.4 に示す。これは、検出の遅れや操作間隔などを原因とする制御則の切り換え遅れが影響したものと考えられる。

先に示した従来の追従制御問題のための可変構造制御則の研究では与える目標軌道が滑らかであり、本プロセスの目標軌道のような急激な変化を伴う場合に対処する手法は示されていない。そこで本研究では、仮想目標値の考えを可変構造制御則に適用することによって、この行き過ぎの問題を解決することを考える。

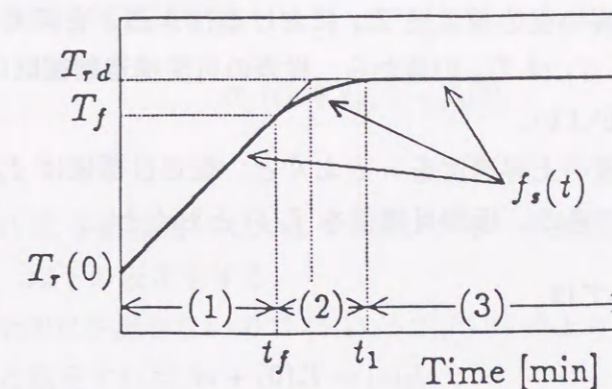


Fig.5.5 Time history of the fictitious set point.

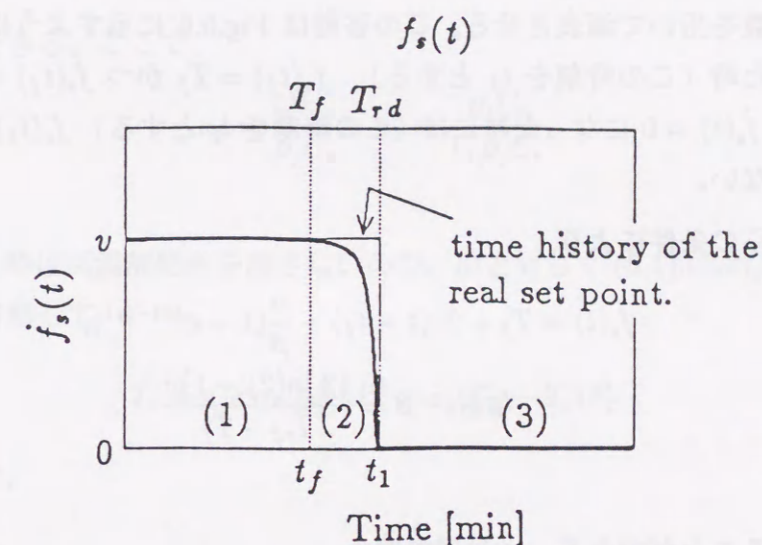


Fig.5.6 Time history of the fictitious set point speed.

5.3.2 仮想目標値とその移動

従来の可変構造制御則による応答では Fig.5.4 に見られるように、真の目標軌道から切り換え面を構成すると、上昇してきた反応槽温度が所要の反応槽温度 T_{rd} に到達した後は、直ちにその温度 T_{rd} に保つことを要求するため、検出の遅れ、操作間隔の影響や反応の時定数が大きいために行き過ぎを起こす。

そこで本研究では、この行き過ぎを減らすために Fig.5.2 に示した真の目標軌道に対して、仮想目標値を Fig.5.5 に示すように、行き過ぎを予測して所要の反応槽温度 T_{rd} に近い寸前の温度 T_f から、滑らかにゆっくりと T_{rd} まで動かすことを考える。 T_f

を適切に与えれば、所要の反応槽温度 T_{rd} における行き過ぎを抑えることができる。著者らの経験によれば、 T_f は T_{rd} の値から、従来の可変構造制御則による応答の行き過ぎ量を差し引いた値がよい。

与えられた反応槽温度の上昇速度を v とおくと、仮想目標値は T_f を与えれば次の式により求めることができる。仮想目標値を $f_s(t)$ とおくと、

(1) $T_r(t) \leq T_f$ においては、

$$f_s(t) = T_r(0) + vt \quad (5.5)$$

(2) 反応槽温度 $T_r(t)$ が T_f に到達した後は、 $f_s(t)$ の速度を (1) における速度 v から指数関数を用いて減衰させる。この移動は Fig.5.6 に示すように $T_r(t)$ が T_f に到達した時 (この時刻を t_f とする)、 $f_s(t_f) = T_f$ かつ $\dot{f}_s(t_f) = v$ であること、その後 $\dot{f}_s(t) = 0$ になった時には (この時刻を t_1 とする) $f_s(t_1) = T_{rd}$ でなければならない。

これらの条件により、

$$f_s(t) = T_f + 2v(t - t_f) + \frac{v}{\beta}(1 - e^{\beta(t-t_f)}), \quad (5.6)$$

$$\text{なお, } \beta = \frac{(2 \ln(2) - 1)v}{T_{rd} - T_f} \quad (5.7)$$

と求めることができる。《付録参照》

(3) 仮想目標値の速度が零になった後は、次式とする。

$$f_s(t) = T_{rd} \quad (5.8)$$

5.3.3 制御則の導出

この節では、前述の仮想目標値による軌道に反応槽温度を追従させるための制御則を求める。これは、従来、切り換え面を真の目標軌道によって構成し、スライディングモード条件を満足する可変構造制御則を求める手法と同様に、以下のように切り換え面を仮想目標値によって構成する。

まず、切り換え面 [227] [194] を

$$\sigma_f(t) \triangleq T_r(t) - f_s(t) \quad (5.9)$$

とおく。

(5.1) 式 ~ (5.4) 式を直接用いてスライディングモード条件から制御則を求めることができないので、以下の仮定をする。

加熱の場合、冷却水を流さないので (5.1), (5.2), (5.3) 式よりジャケット熱容量を省いて直接加熱すると仮定すれば、

$$\dot{T}_r = a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3 + a_2(T_{bi} - T_b)F_b \quad (5.10)$$

とすることができる。ここで、

$$a_1 = \frac{Qk_\infty}{\rho_r C_r}, \quad a_2 = \frac{\rho_b C_b}{V_r \rho_r C_r}$$

とおいた。

逆に冷却する時は高温加熱水を流さないで、前と同じく (5.1), (5.2), (5.4) 式よりコイル熱容量を省略して

$$\dot{T}_r = a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3 + a_3(T_{ci} - T_c)F_c \quad (5.11)$$

とする。ここで、

$$a_3 = \frac{\rho_c C_c}{V_r \rho_r C_r}$$

とおいた。

これらの式を用いてスライディングモード条件 ($\sigma_f \dot{\sigma}_f < 0$) を満足する制御則を求める。 σ_f が負になる場合と正になる場合に分けて考えると、

(1) $\sigma_f < 0$ の時、 $\dot{\sigma}_f > 0$ であれば条件を満足する。この時は仮想的な目標温度 $f_s(t)$ よりも、反応槽温度 $T_r(t)$ が低いので加熱をする必要があり、(5.10) 式の \dot{T}_r を用いる。

$$\dot{\sigma}_f = \dot{T}_r - \dot{f}_s = a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3 + a_2(T_{bi} - T_b)F_b - \dot{f}_s > 0 \quad (5.12)$$

(5.12) 式を満足する F_b の条件を求めれば、 $T_{bi} - T_b > 0$ より

$$F_b = \alpha_1 \frac{|\dot{f}_s - a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3|}{a_2(T_{bi} - T_b)}, \quad \alpha_1 > 1 \quad (5.13)$$

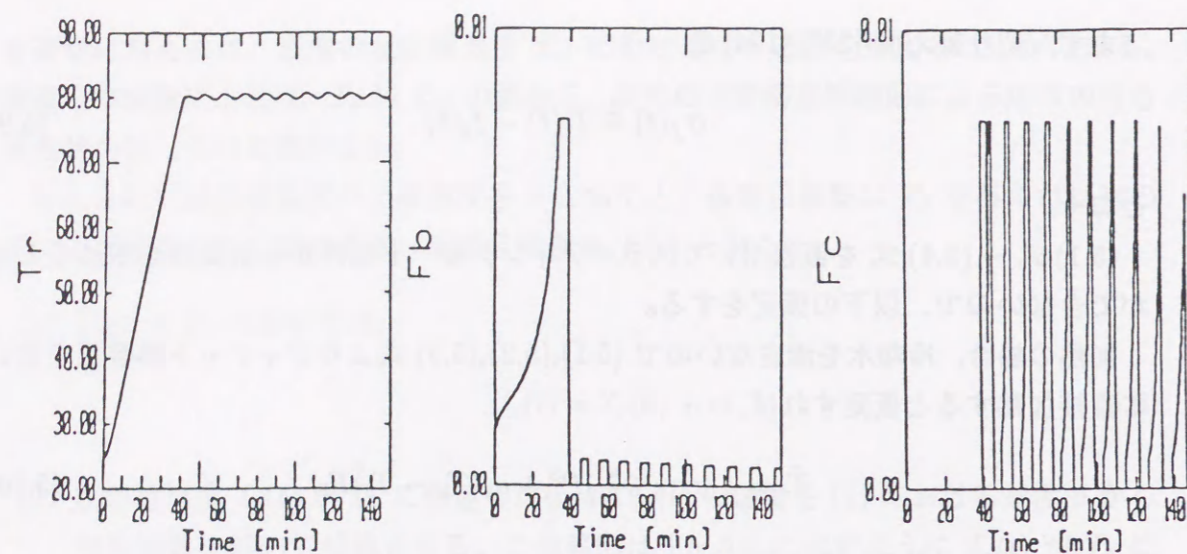


Fig.5.7 Simulation results by VSC with FSP.

となる。

(2) $\sigma_f > 0$ の時, $\dot{\sigma}_f < 0$ であれば条件を満足する。この時は冷却する必要があり, (5.11) 式の \dot{T}_r を用いる。

$$\dot{\sigma}_f = a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3 + a_3(T_{ci} - T_c)F_c - \dot{f}_s < 0 \quad (5.14)$$

(5.14) 式を満足する F_c の条件を求めれば, $T_{ci} - T_c < 0$ より

$$F_c = \alpha_2 \frac{|a_1 \exp\left(\frac{-E}{RT_r}\right) P^3 - \dot{f}_s|}{a_3(T_c - T_{ci})}, \quad \alpha_2 > 1 \quad (5.15)$$

となる。

著者らの経験によれば, α_1 の値はできるだけ小さい方がよく, 大きな値を与えるとすぐに加熱しすぎる傾向がある。他方, α_2 の値は大きいほど応答がよくなるが, 冷却水の流量が飽和しやすい。

5.3.4 シミュレーション結果

前節の P I 制御の場合と同じ条件によるシミュレーション結果を Fig.5.7 に示す。 T_r は 348.15 [K] (75°C) とし, $\alpha_1 = 2, \alpha_2 = 10$ とした。 Fig.5.7 から P I 制御および従来の可変構造制御則による結果と比較して, 問題となった行き過ぎがほとんどないことがわかる。

5.4 ロバスト性の検討

この節では, 仮想目標値を適用した可変構造制御則のロバスト性を検討するために, 制御則のパラメータは変更せずに制御対象のすべての熱通過率を 1.5 倍に, 頻度因子を 2 倍にしてシミュレーションを行った。比較のために P I 制御による結果を Fig.5.8 に, 従来の可変構造制御則による結果を Fig.5.9 に示す。本手法による結果を Fig.5.10 に示す。シミュレーション結果によれば, 仮想目標値を用いないときは, 各応答とも以前より振動が大きくなり, P I 制御と従来の可変構造制御則によれば所要の反応槽温度に到達したときの行き過ぎがより大きくなることわかる。しかしながら, 仮想目標値を適用すれば, この行き過ぎは大きくなることわかる。このことは, 様々な条件を設定してシミュレーションを行い確認している。

5.5 まとめ

本章では, バッチプロセスの温度パターン追従制御問題を検討した。 P I 制御によれば操作全般において振動を起し, また, 従来の可変構造制御則では追従性は向上するが, 所要の反応槽温度に到達した際に P I 制御よりも大きな行き過ぎを起こすことを示した。そこで従来の可変構造制御則に仮想目標値を適用し, その温度の行き過ぎの問題を解決できることを示した。ロバスト性についての検討も行い, その有効性を確認した。仮想目標値は本論文の第 2 章から第 4 章に示したチャタリング低減化の効果を与える他に, 可変構造制御則に適用し, 追従制御における応答をも改善できることを示した。

なお, 本研究を行うにあたり, 反応槽についての種々の情報の御便宜を頂いた保土ヶ谷化学工業株式会社の坂田喜一郎氏に深謝する。

《付録》

Fig.5.6 の (2) の曲線は

$$\dot{f}_s(t) = v + (v - ve^{\beta(t-t_f)}) \quad (A.1)$$

と表すことができる。 $f_s(t) = 0$ となる時刻が t_1 であるから、これを求めると、

$$t_1 = \frac{\ln 2}{\beta} + t_f \quad (A.2)$$

となる。(A.1) 式を $t - t_f$ について積分すると、次式を得る。

$$f_s(t) = 2v(t - t_f) - \frac{v}{\beta} e^{\beta(t - t_f)} + C, \quad C: \text{積分定数} \quad (A.3)$$

$t = t_f$ の時、 $f_s(t_f) = T_f$ より (A.3) 式は、

$$f_s(t_f) = -\frac{v}{\beta} + C = T_f \quad (A.4)$$

となる。ゆえに

$$C = T_f + \frac{v}{\beta} \quad (A.5)$$

を得る。この C を (A.3) 式に代入し、さらに $t = t_1$ の時を考えて (A.2) 式を代入する。

$$\begin{aligned} f_s(t_1) &= T_f + 2v(t_1 - t_f) - \frac{v}{\beta} e^{\beta(t_1 - t_f)} + \frac{v}{\beta} \\ &= T_f + \frac{v}{\beta} (2\ln 2 - 1) \end{aligned} \quad (A.6)$$

$t = t_1$ の時、 $f_s(t_1) = T_{rd}$ でなければならないから、

$$f_s(t_1) = T_f + \frac{v}{\beta} (2\ln 2 - 1) = T_{rd} \quad (A.7)$$

上式より β を得る。

$$\beta = \frac{(2\ln 2 - 1)v}{T_{rd} - T_f} \quad (A.8)$$

Table.5.1 Parameters of a process model.

P	[mol/m ³]		反応槽内の製品の濃度
T_r	[K]		反応槽内の製品の温度
T_c	[K]		冷却水の温度
F_c	[m ³ /s]	0.008(max)	冷却水の流量
T_b	[K]		高温加熱水の温度
F_b	[m ³ /s]	0.008(max)	高温加熱水の流量
k_c	[J/m ² sK]	200	コイルと反応槽間の熱通過率
k_j	[J/m ² sK]	650	反応槽とジャケット間の熱通過率
A_c	[m ²]	10	コイルの伝熱面積
A_j	[m ²]	25	ジャケットの伝熱面積
V_c	[m ³]	0.1	コイル内の容量
V_r	[m ³]	7.5	反応槽内の容量
V_j	[m ³]	0.5	ジャケット内の容量
ρ_r	[mol/m ³]	16000	製品の熱容量
ρ_c	[kg/m ³]	998.2	冷却水の密度
ρ_b	[kg/m ³]	998.2	高温加熱水の密度
C_r	[J/molK]	70	反応槽内の比熱
C_c	[J/kgK]	4185.5	冷却水の比熱
C_b	[J/kgK]	4185.5	高温加熱水の比熱
T_{ci}	[K]	293.15	冷却水の流入温度 (20°C)
T_{bi}	[K]	367.15	高温加熱水の流入温度 (94°C)
k_∞		10	頻度因子
E	[J/mol]	89000	活性化エネルギー
R	[J/molK]	8.3	気体定数
Q	[J/mol]	20200	反応熱

Table.5.2 Parameters of simulation conditions.

ルンゲクッタ法の刻み幅	0.5
サンプリング周期	1 [sec]
検出端の一次遅れの時定数	60 [sec]
操作間隔	20 [sec]
操作量の供給のむだ時間	5 [sec]
P の初期濃度	5800 [mol/m ³]
T_r の初期温度	298.15 [K] (25°C)
T_b の初期温度	293.15 [K] (20°C)
T_c の初期温度	293.15 [K] (20°C)
T_{rd}	353.15 [K] (80°C)
v	0.022917

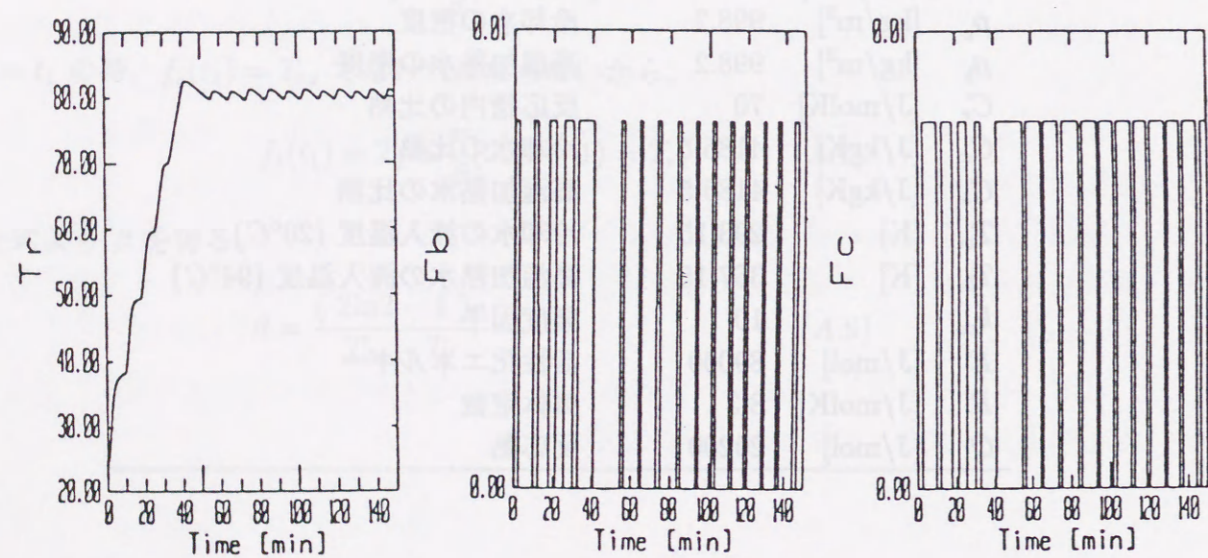


Fig.5.8 Simulation results by PI control.

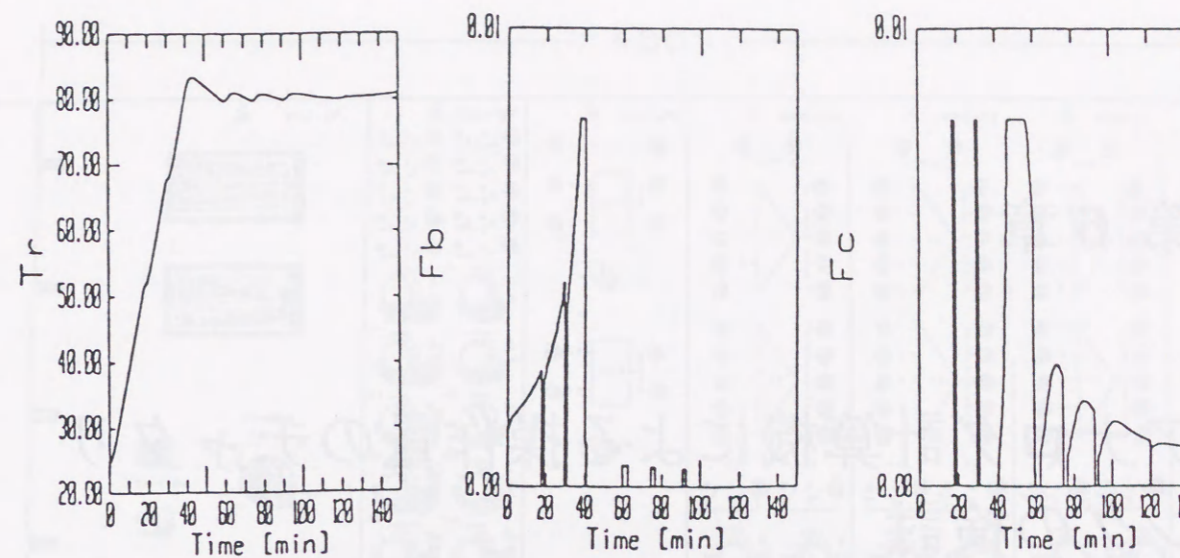


Fig.5.9 Simulation results by VSC without FSP.

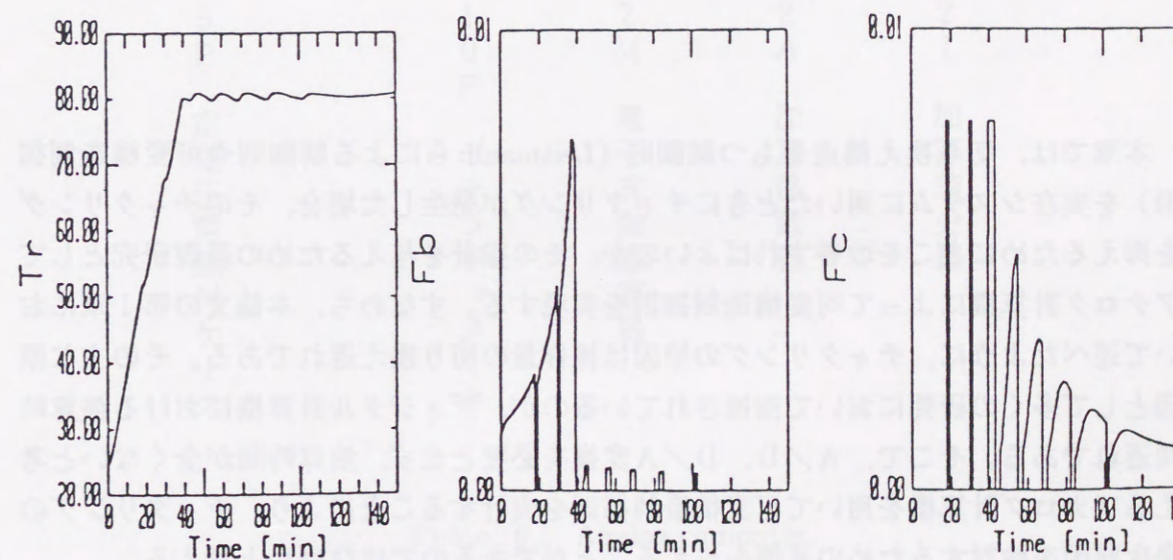


Fig.5.10 Simulation results by VSC with FSP.

第 6 章

アナログ計算機による操作量のチャタリングの検討

6.1 はじめに

本章では、切り換え構造をもつ制御則（Leitmann らによる制御則や可変構造制御則）を实在システムに用いたときにチャタリングが発生した場合、そのチャタリングを抑えるためにどこを改善すればよいのか、その指針を与えるための基礎研究としてアナログ計算機によって可変構造制御則を実現する。すなわち、本論文の第 1 章において述べたように、チャタリングの原因は操作量の切り換え遅れである。その主な原因として多くの研究において指摘されているのが、ディジタル計算機における演算時間遅れである。そこで、A/D、D/A変換を必要とせず、演算時間が全くないと考えるアナログ計算機を用いて可変構造制御則を実行することにより、チャタリングの発生原因を検討するための基準を与えることができるのではないかと考える。

同じ例題を同じ条件でディジタル計算機およびアナログ計算機によりシミュレーションを行い、その比較を行うことで演算時間の影響を明らかにすることが目的である。

使用したアナログ計算機を Photo. 6.1 に、その性能を Table.6.1 に示す。

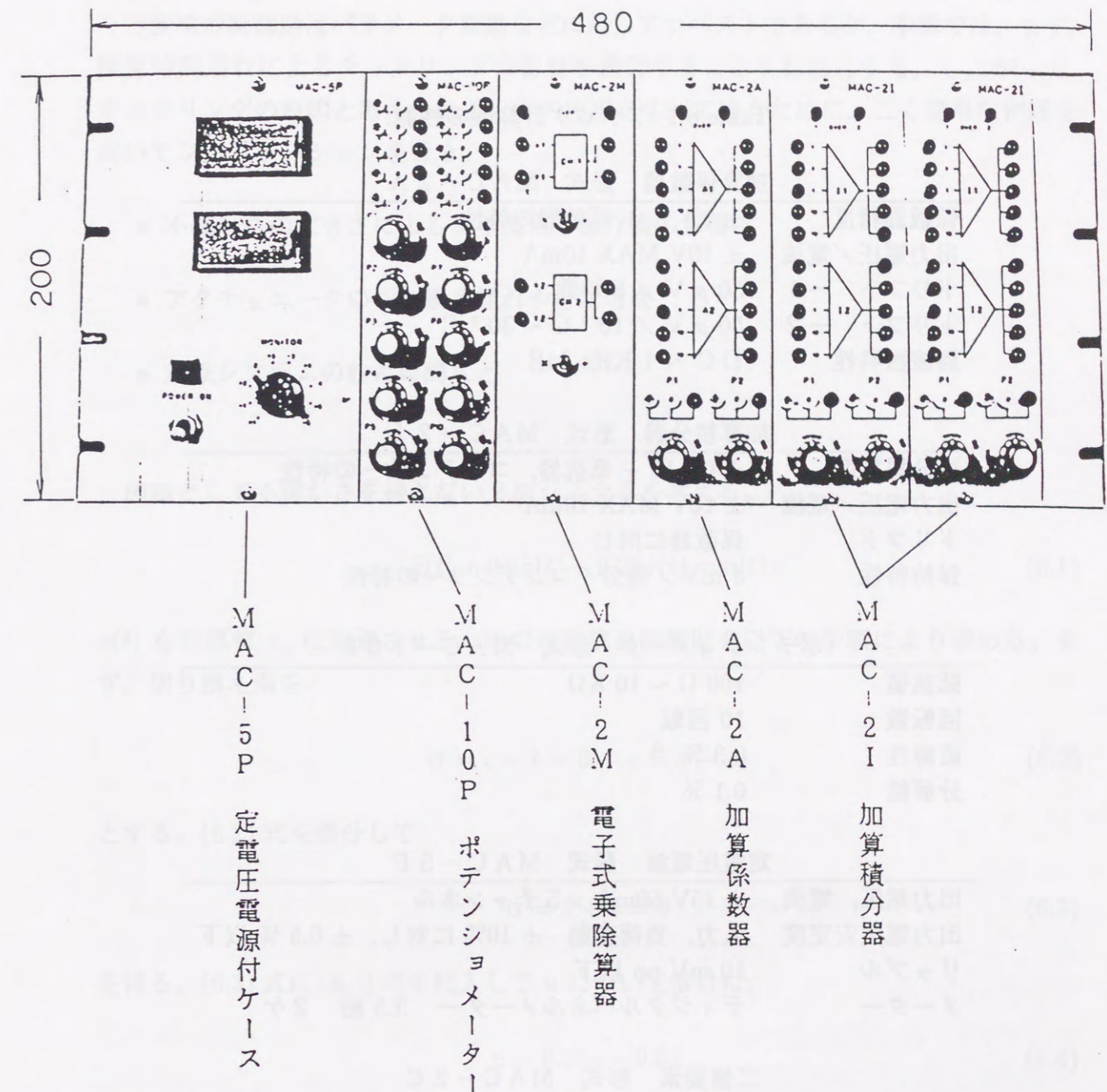


Photo. 6.1 Analog computer.

Table.6.1 アナログ計算機の性能.

加算係数器 形式 MAC-2A	
係数器精度	± 0.1 % + 抵抗器の特性
出力電圧/電流	± 10V MAX 10mA
ドリフト -1	50 μV / 8時間
ドリフト -2	50 μV / 10°C ~ 30°C
周波数特性	DC ~ 1 KHz-3dB
加算積分器 形式 MAC-2I	
積分器精度	± 0.1 % + 抵抗器, コンデンサーの特性
出力電圧/電流	± 10V MAX 10mA
ドリフト	係数器に同じ
保持特性	5 mV / 毎分 + コンデンサーの特性
ポテンショメータ 形式 MAC-10P	
抵抗値	100 Ω ~ 10 KΩ
回転数	10 回転
直線性	0.3 %
分解能	0.1 %
定電圧電源 形式 MAC-5P	
出力電圧, 電流	± 15V 50mA × 5 チャンネル
出力電圧安定度	入力, 負荷変動 ± 10% に対し, ± 0.5 % 以下
リップル	10 mV pp 以下
メーター	デジタルパネルメーター 3.5 桁 2ケ
二値要素 形式 MAC-2C	
出力電圧, 電流	± 10 V, 最大 10 mA
接点定格	最大 100 mA

6.2 シミュレーションのための例題

可変構造制御則はパラメータ変動などに対してロバストであるが, 本章では, まず, 演算時間遅れによるチャタリングの影響を検討することを目的とする。したがって, チャタリングの原因と考えられる以下の内容をすべて除くために, ごく簡単な例題を用いてシミュレーションを行う。

- 不確かさの大きさによる切り換える操作量の影響
- アクチュエータの切り換え遅れやむだ時間
- 対象システムのむだ時間など

例題として不確かさを持たない2次システムを考える。

$$\ddot{x}(t) + 0.5\dot{x}(t) + 0.25x(t) = u(t) \quad (6.1)$$

$x(t)$ を目標値 x_d に到達させるための可変構造制御則を以下の手順により求める。まず, 切り換え面を

$$\sigma = e + \dot{x} = 0, \quad e \triangleq x - x_d \quad (6.2)$$

とする。(6.2) 式を微分して,

$$\dot{\sigma} = \dot{x} + \ddot{x} = 0 \quad (6.3)$$

を得る。(6.3) 式に (6.1) 式を代入して u について解けば,

$$u = 0.25x - 0.5\dot{x} \quad (6.4)$$

この操作量 u は, 対象システムの状態が切り換え面上にあるときのスライディングモードをもたらす等価操作量である。(1章4節参照)

次に, (6.4) 式の u を u_{eq} とおいて, 切り換え面上にない状態を切り換え面に向かわせるための切り換え操作量を求める。新たに操作量を

$$u = u_{eq} - \text{sgn}(\sigma) \cdot \beta \quad (6.5)$$

とにおいて、スライディングモード条件 ($\sigma \dot{\sigma} < 0$) を満足する β を求める。

$$\begin{aligned}\sigma \cdot \sigma &= \sigma(\dot{x} + \ddot{x}) \\ &= \sigma(\dot{x} + (u - 0.5\dot{x} - 0.25x)) \\ &= \sigma(-0.25x + 0.5\dot{x} + u) \\ &= \sigma(-0.25x + 0.5\dot{x} + (u_{eq} - \text{sgn}(\sigma) \cdot \beta)) \\ &= \sigma(-\text{sgn}(\sigma) \cdot \beta)\end{aligned}\quad (6.6)$$

$\beta > 0$ であれば $\sigma \dot{\sigma} < 0$ が成り立つ。したがって、ここでは $\beta = 1$ とする。

対象システムの状態が切り換え面上にあれば、 $\text{sgn}(\sigma) = 0$ となり、システムはスライディングモードにあると言われ、等価操作量 $u = u_{eq}$ により (6.2) 式, (6.3) 式が成り立つ。しかし、 $\text{sgn}(\sigma) = 0$ となるのは、理想的な、すなわち無限に近い操作量の切り換えを実現できるときに限られる。また、 sgn 関数による不連続性を避けるために、一般には次の sat 関数を用いる。(1章4節参照)

$$\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & (|\sigma| > \epsilon \text{ のとき}) \\ \sigma/\epsilon & (|\sigma| \leq \epsilon \text{ のとき}) \end{cases}\quad (6.7)$$

6.3 デジタル計算機によるシミュレーション結果

まず、デジタル計算機によるシミュレーションを行う。目標値は $x_d = 1$ とし、サンプリング周期は 0.001 [sec] とした。制御周期は 0.01 [sec] に設定して行う。これは、操作量をホールドしている時間に等しい。

ϵ の値を変えた場合のシミュレーション結果を Fig.6.1 に示す。この結果から、 ϵ の値を大きくするにつれて定常偏差が徐々に大きくなるのがわかる。これは、制御則が $-\epsilon < 0 < \epsilon$ の範囲では比例制御則になるために起こる。

ここで、このようにチャタリングを避けるために、 ϵ の値を大きく設定した際の定常偏差が問題になる場合、制御則に積分動作を付け加えることにより、この偏差を減らす手法が提案されている [175] [198] [204]。

次に、 $\epsilon = 0.01$ に固定して、制御周期を変えた場合のシミュレーション結果を Fig.6.2 に示す。操作量を切り換える周期が長くなるとチャタリングを起こすことがわかる。

従って、所要の目標値への漸近性を得るために ϵ を小さくした際に、制御周期が長いとチャタリングを起こすことが分かる。

6.4 アナログ計算機によるシミュレーション結果

アナログ計算機を用いて、同じ条件でシミュレーションを行う。回路図を Fig.6.3 に示す。その結果を Fig.6.4 に示す。ただし、 $\epsilon = 0.001$ は回路の作製が難しく実現できていない。 sgn 関数を用いた結果を見ると、チャタリングがほとんど起きていないが、実際には対象システムの状態が切り換え面に到達した際にチャタリングが起こる。これは、ペンレコーダの印字能力を超える速い周期のチャタリングである。

6.5 考察

デジタル計算機によるシミュレーションの場合、 sgn 関数を用いれば制御周期に関係なく、非常に激しいチャタリングを起こす。アナログ計算機によれば、チャタリングが少なく、操作量が負の値で大きくなるだけのチャタリングである。このことは、デジタル計算機では、対象システムの状態が切り換え面を行き過ぎてから操作量を切り換えており、アナログ計算機では、状態が切り換え面に到達した時点において操作量を切り換えていると言える。アナログ計算機によれば、切り換え面に到達した直後において、敏感に操作量を切り換えることができるのでスライディングモードに近い理想的な応答を実現できる。このことから、デジタル計算機の D/A, A/D, 演算時間を含む制御周期を非常に短くすれば、チャタリングの低減化と理想的なスライディングモードを実現できる可能性がある。しかしながら、可変構造制御則を LSI 化して電動機の精密な位置決めに適用した研究発表によれば、制御信号に対応するために、一般には用いられていない大型で高速なアクチュエータを用いる必要がある。

sat 関数を用いて実行した場合、デジタル計算機の結果から、制御周期が短い程、チャタリングの低減化および目標値への漸近性に効果があることがわかる。このことはアナログ計算機によるシミュレーション結果からも裏付けられる。問題になるのは、

所要の目標値への漸近性から ϵ の値を小さくしなければならない場合である。現状ではデジタル計算機を使うことがほとんどであり、制御周期を短くするためにも、ハードウェアの問題であり、アクチュエータも含めて考えると限界がある。

6.6 まとめ

従来の研究によれば、チャタリングの低減化には sat 関数の使用および制御周期を短くすればよいと述べられている。このことは、本章による検討においても実際に確認することができた。

高速演算がハードウェアにおいて限界がある場合、または高速な切り換えがアクチュエータに著しい負担をかけるとか、実現できない場合、チャタリングを低減するためには、 ϵ の値を大きくして切り換え面近傍における操作量を少なくしてチャタリングを低減する手法が有効であることを確認した。ただし、定常偏差が残る問題がある。これは、積分動作を加えることで漸近性を向上させることができる。しかしながら、この手法では計算量が増大し、積分時間を選ぶ指針が今だ示されていない。

これらのことより、チャタリングが起こる場合には、所要の ϵ を変更して目標値への漸近性を犠牲にするのではなく、切り換える操作量を少なくしてチャタリングを低減する手法が現実的であり、有効であることがわかる。すなわち、仮想目標値の有効性が裏付けられたといえる。

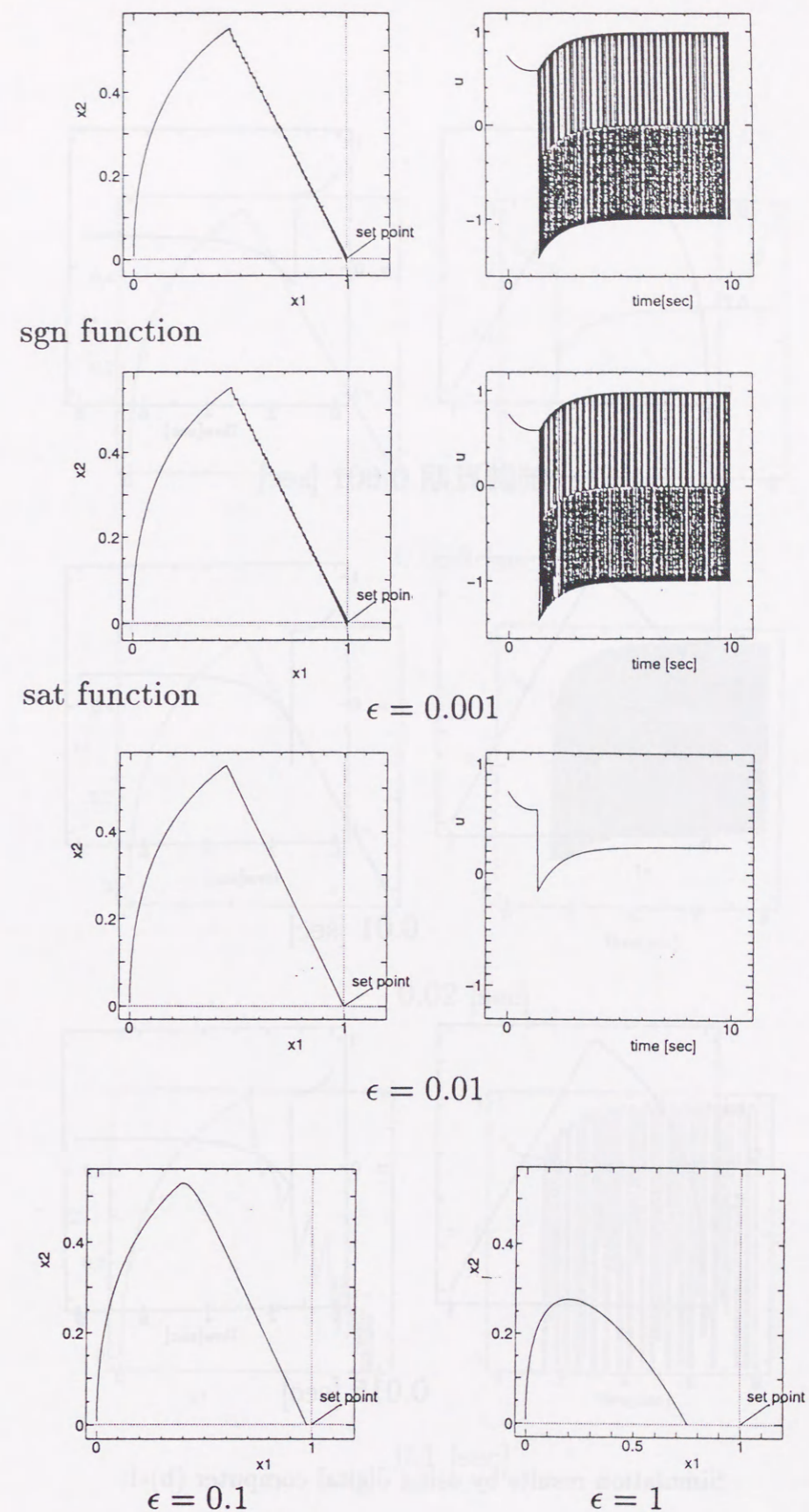
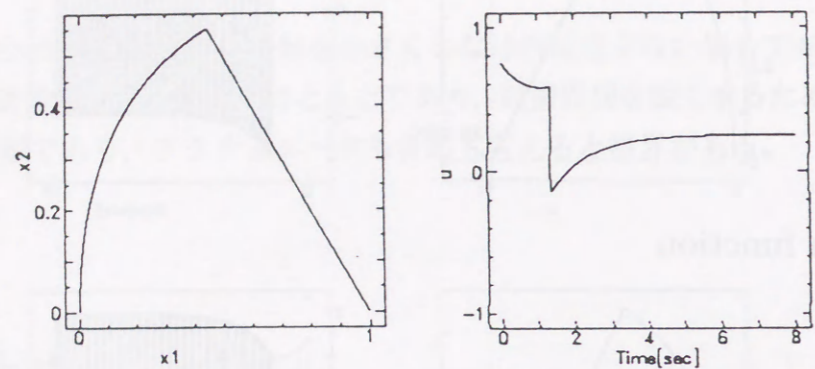
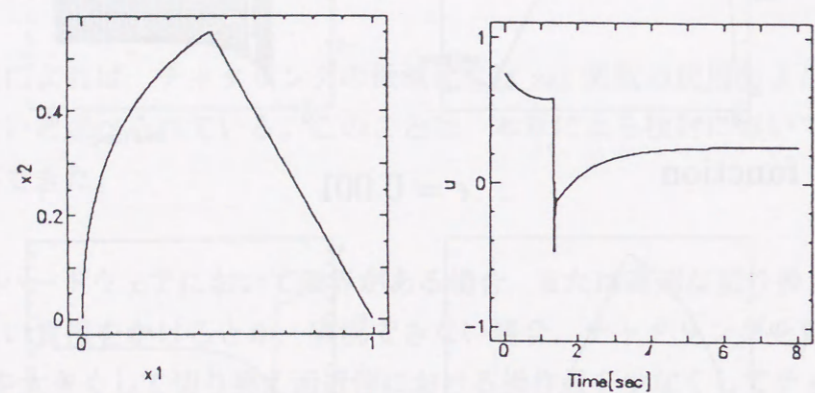


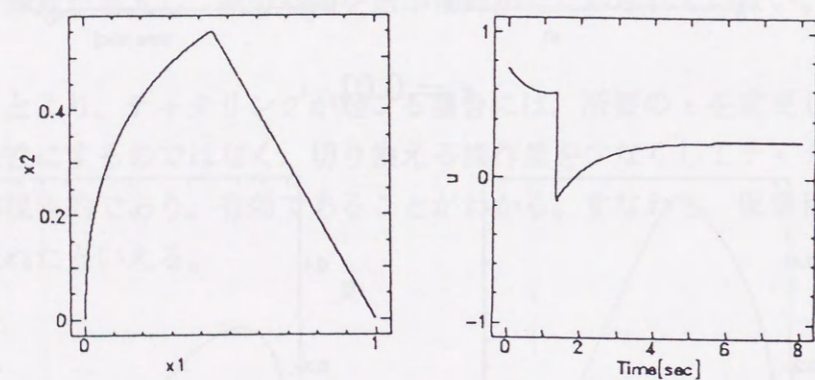
Fig.6.1 Simulation results by using digital computer (a).



制御周期 0.001 [sec]

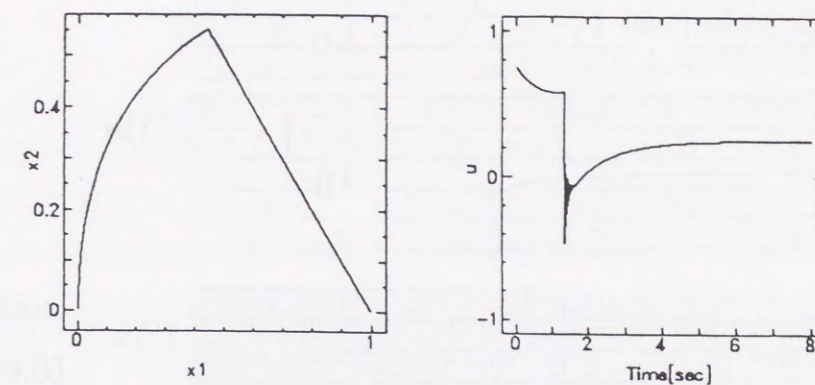


0.01 [sec]

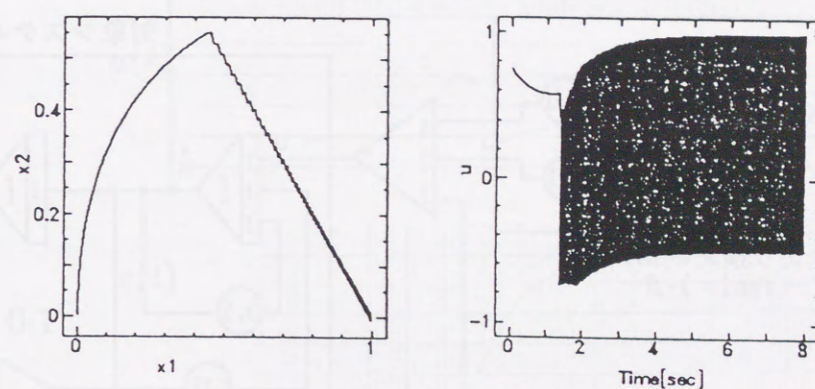


0.015 [sec]

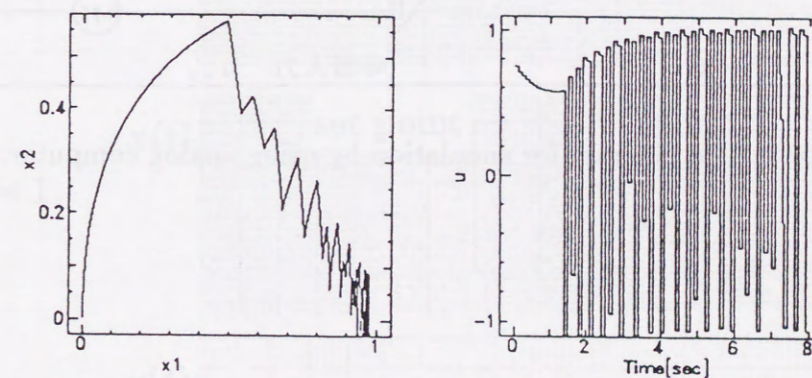
Simulation results by using digital computer (b)-1.



0.018 [sec]



0.02 [sec]



0.1 [sec]

Fig.6.2 Simulation results by using digital computer (b)-2.

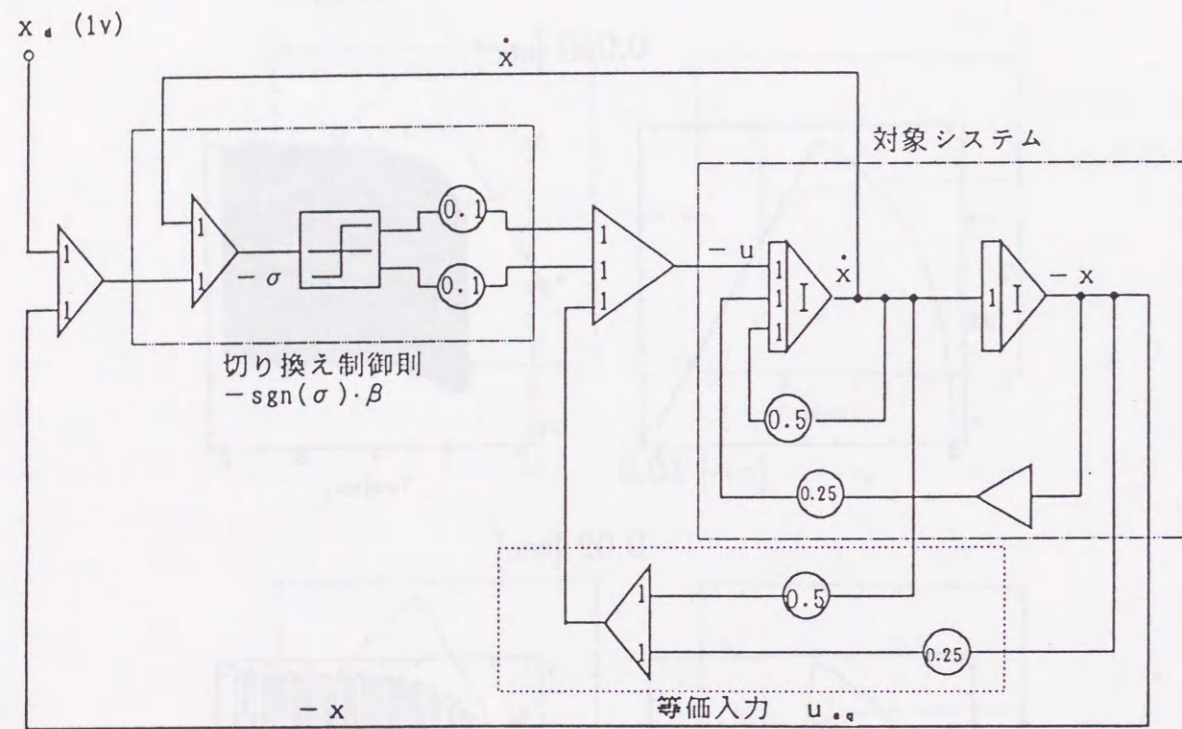


Fig.6.3 The diagram for simulation by using analog computer.

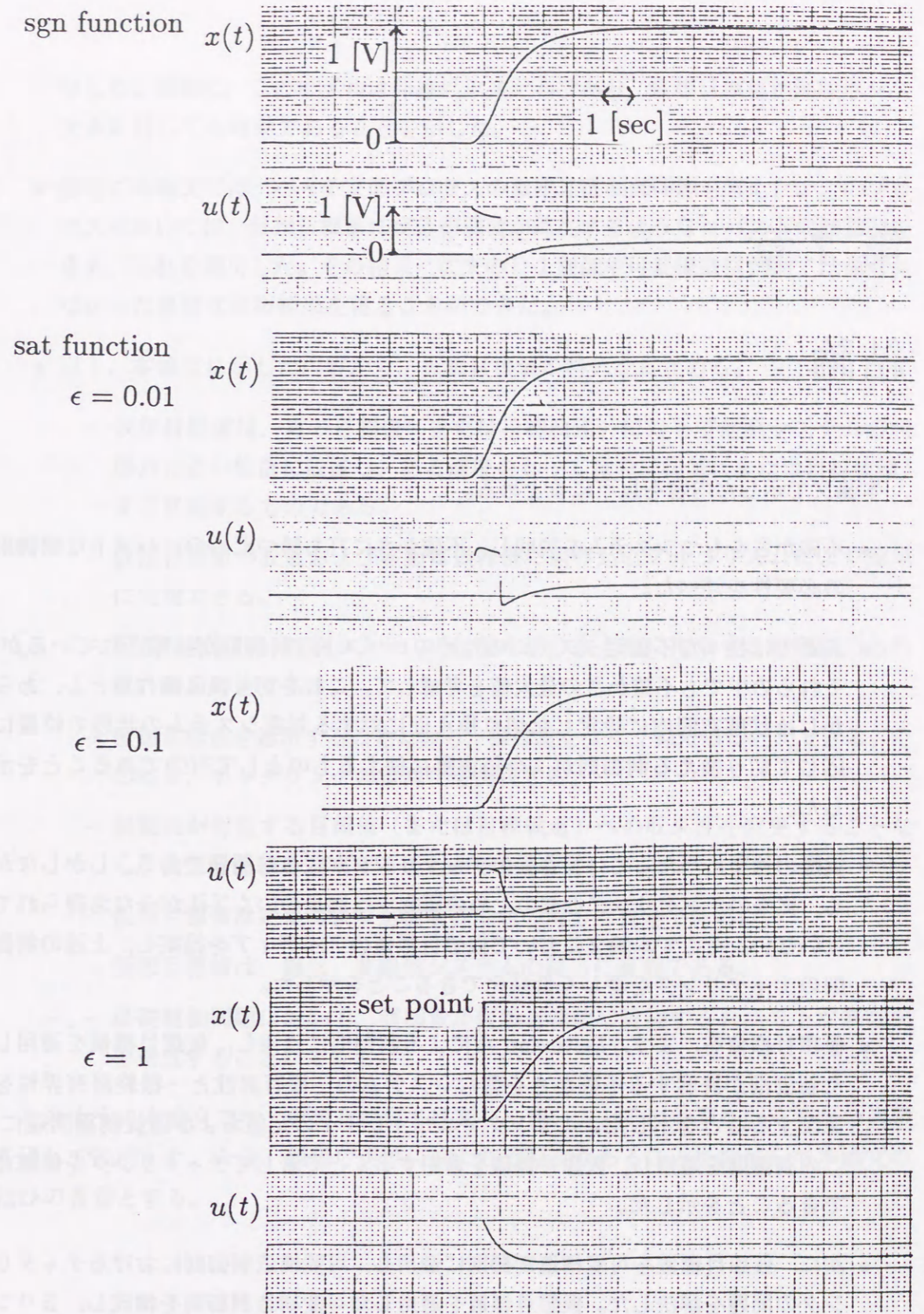


Fig.6.4 Simulation results by using analog computer.

第 7 章

結論

本論文で示した内容を以下にまとめる。

- 不確かさをもつシステムを説明し、不確かさに打ち勝つためのロバストな制御則の必要性を述べた。
- 最近では様々な不確定システムのためのロバストな制御則が提案されているが、それらの中でも不確かさの最大値を考慮して、これを切り換え操作量とし、あらかじめ状態空間内に設定した切り換え面に対する対象システムの状態の位置に応じて切り換える制御則が、今後実際に使えるものとして有効であることを示した。
- 実際の適用に当たっては操作量のチャタリングが大きな問題である。しかしながら、従来のチャタリング低減のための研究では満足いく手法が今なお得られてはいない。そこで本論文において仮想目標値のアイデアを提案し、上述の制御則のチャタリングを著しく低減化できることを示した。
- 仮想目標値を、まず、Leitmann らによる制御則に適用し、仮想目標値を適用した制御則が許容する不確かさを含むシステムの一様有界性と一様終局有界性を保証することを示した。1 リンクマニピュレータの定値および追従制御問題に、この制御則を適用し、仮想目標値を適用することで著しくチャタリングを低減化できることを示した。
- 次に、仮想目標値を可変構造制御則に適用し、可変構造制御則におけるチャタリングの問題を解決した。仮想目標値を適用した可変構造制御則を構成し、2 リンクマニピュレータの制御問題を検討した。仮想目標値を適用しない場合にはチャタリングを生ずるが、仮想目標値を適用することで、著しく低減化できることを

示した。同時に、このモデルは非線形システムであり、仮想目標値が非線形システムに対しても有効であることを示した。

- 最後に本論文では、バッチ反応プロセスの温度追従制御問題を考えた。このプロセスにおいては、仮想目標値に反応槽温度が追従するようなロバストな制御則を求め、これを適用した。その結果、従来の P I 制御や可変構造制御則では得られなかった良好な追従結果を得ることができた。
- 以上、本論文に示した内容から、仮想目標値の特色をまとめる。
 - － 仮想目標値は、真の目標値（または目標軌道）に対して対象システムの状態点に近い位置に設置し、ある速度をもって真の目標値（または目標軌道）まで移動するものである。
 - － 仮想目標値の設置および移動は操作部に組み込むアルゴリズムにより簡単に実現できる。
 - － 仮想目標値は、対象システムの状態を切り換え面に拘束する制御則であれば、適用可能である。
 - － 仮想目標値を適用することにより、操作量を少なく抑えることができる。その結果、チャタリングの低減化を実現する。
 - － 制御則が保証する目標値（または目標軌道）への収束性を変更することなく、仮想目標値を適用することができる。
 - － 仮想目標値は定値および追従制御問題の両方に有効である。
 - － 仮想目標値は、線形、非線形システムの両方に有効である。
 - － 追従制御問題において、制御量が仮想目標値に追従するロバストな制御則を構成することができる。

このように本論文では、仮想目標値を提案し、使い方とその効果をいくつかの例題を通して説明した。今後、現場で実際に使われる機会があることを期待して本論文の結びの言葉とする。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大学院の修士課程からご指導をいただきました法政大学 増淵正美教授（大阪大学名誉教授）に心から感謝いたします。先生には、お忙しい時間を割いていただき、研究の進め方、制御とはいかなることか、そして論文のまとめ方と添削と、とても多くのご指導をいただきました。増淵先生のご指導がなければ、本論文をまとめることができなかつたと思います。その他にも、研究者として物事をどのように考え、将来何をすべきなのか、自分をどのように磨けばよいのか、研究以外のことについても先生から多くのことを学びました。

また、本論文のために時間を費やして審査していただき、いたらない点、わかりにくい箇所などをご助言ご指摘をしてくださいました法政大学 渡辺嘉二郎教授、小林尚登教授、そして高島俊教授に心から感謝いたします。特に、渡辺先生には日頃からご助言をいただきまして、ありがとうございました。

私にとって増淵先生と同様に指導教授のような都立大学理工学部 川田誠一助教授に心から感謝いたします。川田先生には修士課程のときからご指導をいただき、仮想目標値の構想について、先生も討論に参加してくださいました。さらに、投稿論文の照会に対する回答について、私のために多くの時間をかけて下さいました。ありがとうございました。

それから、卒業論文におきましてお世話になりました法政大学 島田道彦教授、宮武直樹先生に感謝いたします。学部生の時に充実した研究をさせていただいたきっかけにより、ここまで進ことができました。

横河電機株式会社の 大谷哲也さんには論文のまとめ方や、実際と理論の違いなど色々なことを教わりました。社会人として、また博士課程の院生として、お忙しいところをありがとうございました。特に海外への投稿、そして発表のときには、大変お世話になりました。

3年間私の研究を手伝ってくれた 吉森文紀君（現三菱電機株式会社）に感謝の言葉を送るのを忘れることはできません。彼との討論によって非常に多くのことを学び、そして得ることができました。また、足立淳君（現総合研究大学院生）には、本論文のバッチプロセスの研究において彼の研究成果を提供してもらいました。

現在、増淵研究室の博士課程院生である 味野真治君、福沢充孝君にもお世話になりました。同じ研究室の修士課程院生である 吉田保彦君、東明裕君にも、発表の準備などで色々迷惑をかけました。本論文で用いたアナログ計算機については、学部生である 戸塚健一君に手伝ってもらいました。みなさん、どうもありがとう。

最後に、酒井紫さんの叱咤激励は、私にとって励みになり、また、心の支えでした。とても感謝しています。それから、私の長きにわたる学生生活を黙って支えてくれた父と母に感謝の言葉を送ります。ありがとうございました。

文献

- [1] A.F.Filippov: Application of the theory of differential equations with discontinuous right-hand sides to non-linear problems in automatic control, First IFAC Congress, 1960
- [2] 伊藤 (編): ロバスト制御の理論と応用, コンピュートロール, 13, コロナ社, 1986
- [3] 計測自動制御学会ミニ特集: ロバスト制御, 計測と制御, Vol.26, No.5, 1987
- [4] 増淵: モデリングと制御系設計, 計測と制御, Vol.27, No.3, 285/294, 1988
- [5] 計測自動制御学会ミニ特集: ロバスト制御— H^∞ を中心にして, 計測と制御, Vol.29, No.2, 1990
- [6] A.S.I.Zinober: Deterministic control of uncertain systems, IEE Control Engineering 40, Published by: Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990
- [7] D.Hinrichsen and B.Martensson: Control of Uncertain Systems, Proceedings of an International Workshop, Bremen, West Germany, June 1989
- [8] システム制御情報学会誌特集: ロバスト制御とその周辺小特集号, システム/制御/情報, Vol.35, No.5, 1991
- [9] 計測自動制御学会特集: 実用期を迎えたロバスト制御, 計測と制御, Vol.30, No.8, 1991
- [10] S.P.Bhattacharyya and L.H.Keel: Control of uncertain dynamic systems, CRC Press, 1991
- [11] システム制御情報学会: 化学バッチプロセス特集号, システム/制御/情報, Vol.35, No.3, 123/167 (1991)
- [12] Vadim.I.Utkin: Sliding Modes in Control and Optimization, Communications and Control Engineering Series, Springer-Verlag, 1992

- [13] 計測自動制御学会創立 30 周年記念特集号: 適応制御の現状と将来, Vol.31, No.1, 122/124, 1992
- [14] 計測自動制御学会ミニ特集: 非線形制御理論, 計測と制御, Vol.31, No.8, 1992
- [15] 足立, 川田, 増淵: バッチ式フェノール重合反応器のモデリングと制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.31, No.1, 1993

線形不確定システムのための制御則に関する論文

- [16] B.R.Barmish, M.Corless and G.Leitmann: A new class of stabilizing controllers for uncertain dynamical systems, SIAM J.Control Optimiz., 21-2, 246/255, 1983
- [17] B.R.Barmish, I.R.Petersen and A.Feure: Linear Ultimate Boundedness Control of Uncertain Dynamical Systems, Automatica, 19-5, 523/532, 1983
- [18] D.P.Looze, H.V.Poor, K.S.Vastola and J.c.Darragh: Minimax Control of Linear Stochastic Systems with Noise Uncertainty, IEEE Trans., AC-28-9, 882/888, 1983
- [19] A.Steinberg and M.Corless: Output Feedback Stabilization of Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-30-10, 1025/1027, 1985
- [20] C.V.Hollot: Bound invariant lyapunov function: a means for enlarging the class of stabilizable uncertain systems, Int.J.Control, 46-1, 161-184, 1987
- [21] I.R.Petersen: Notions of stabilizability and controllability for a class of uncertain linear systems, Int.J.Control, 46-2, 409/422, 1987
- [22] S.S.Wang, B.S.Chen and T.P.Lin: Robust stability of uncertain time-delay systems, Int.J.Control, 46-3, 963/976, 1987
- [23] W.E.Schmitendorf: Stabilizing controllers for uncertain linear systems with additive disturbances, Int.J.Control, 47-1, 85/95, 1988

- [24] W.E.Schmitendorf: Designing Stabilizing Controllers for Uncertain Systems Using the Riccati Equation Approach, IEEE Trans., AC-33-4, 376/379, 1988
- [25] I.R.Petersen: Quadratic Stabilizability of Uncertain Linear Systems Containing Both Constant and Time-Varying Uncertain Parameters, J. Optimiz. Theory Appl., 57-3, 439/461, 1988
- [26] M.E.Magana and Stanislaw H.Żak: Robust Output Feedback Stabilization of Discrete Time Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-33-11, 1082/1085, 1988
- [27] Abdul-Amir A.Abdul-Wahab: Robustness Measure Bounds for Optimal Model Matching Control Designs, IEEE, Trans., AC-33-12, 1178/1180, 1988
- [28] T.Mori and H.Kokame: Stability of $X(t) = AX(t) + BX(t - \tau)$, IEEE Trans., AC-34-4, 460/462, 1989
- [29] 小原, 北森: Lyapunov 方程式解の指定による構造的変動に対するロバスト制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.6, 682/689, 1989
- [30] Sheng-De Wang and Te-Son Kuo: Performance bounds of optimal linear systems with uncertain parameters, Int.J.Control, 50-4, 1185/1194, 1989
- [31] IAN R.Petersen: Complete Results for a Class of State Feedback Disturbance Attenuation Problems, IEEE, AC-34-11, 1196/1199, 1989
- [32] E.Cheres, Z.J.Palmor and S.Gutman: Quantitative Measures of Robustness for Systems Including Delayed Perturbations, IEEE, AC-34-11, 1203/1204, 1989
- [33] 大屋, 西村, 米澤: ある不確かな系のオブザーバを用いた安定化, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.2, 151/158, 1990
- [34] K.Wei: Quadratic Stabilizability of Linear Systems with Structural Independent Time-Varying Uncertainties, IEEE Trans., AC-35-3, 268/277, 1990
- [35] A.-A.A.Abdul-Wahab: Robustness measure bounds for lyapunov-type state-feedback systems, IEE Proc., 137-5, 337/340, 1990

- [36] P.P.Khargonekar, Ian R.Petersen and K.Zhou: Robust Stabilization of Uncertain Linear Systems: Quadratic Stabilizability and H^∞ Control Theory, IEEE Trans., AC-35-3, 356/361, 1990
- [37] I.S.Sadek: Optimal Control of Time-Delay Systems with Distributed Parameters, J.of Optimization Theory and Applications, Vol.67, No.3, 567/585, 1990
- [38] O.I.Kosmidou: Robust stability and performance of systems with structured and bounded uncertainties: an extension of the guaranteed cost control approach, Int.J. Control, 52-3, 627/640, 1990
- [39] Guoxiang Gu: Stabilizability Conditions of Multivariable Uncertain Systems via Output Feedback Control, IEEE, Trans., AC-35-8, 925/927, 1990
- [40] A.Saberi and P.Sannuti: Observer-based control of uncertain systems with nonlinear uncertainties, Int.J.Control, 52-5, 1107-1130, 1990
- [41] Altug Iftar and Umit Ozguner: Modeling of Uncertain Dynamics for Robust Controller Design in State Space, Automatica, Vol.27, No.1, 141/146, 1991
- [42] KEQIN.Gu, Y.H.Chen, M.A.Zohdy and Nan K.Loh: Quadratic Stabilizability of Uncertain Systems: A Two Level Optimization Setup, Automatica, 27-1, 161/165, 1991
- [43] Jyh-Horng and Ing-Rong Horng: Stabilizing Controllers for Uncertain Linear Saturating Systems With Additive Disturbances, Trans. of ASME, J. of DSMC, Vol.113, 334/336, 1991
- [44] Kourosh Danai and Hsinyung Chin: Fault Diagnosis With Process Uncertainty, Trans. ASME, J. of DSMC, Vol.113, 339/343, 1991
- [45] Er-Wei Bai: Adaptive Quantification of Model Uncertainties by Rational Approximation, IEEE Trans., AC-36-4, 441/453, 1991
- [46] L.Xie and C.E.de Souza: Robust H^∞ control for class of uncertain linear time-invariant systems, IEE Proc., Vol.138, No.5, 479/483, 1991
- [47] Yossi Chait, Neil F.Lacey and C.R.MacCluer: Using Operational Calculus to Obtain Transient Response Estimates in Linear Uncertain Feedback Systems, Trans., ASME, J.of DSME, Vol.113, sep., 523/525, 1991

- [48] Feng-Hsiag Hsiao, Jer-Guang Hsieh and Min-Sheng Wu: Determination of the Tolerable Sector of Series Nonlinearities in Uncertain Time-Delay Systems Under Dynamical Output Feedback, *Trans., ASME, J.of DSMC*, Vol.113, sep., 525/530, 1991
- [49] W.L.Chen and J.S.Gibson: A Lyapunov Robustness Bound for Linear Systems with Periodic Uncertainties, *Automatica*, Vol.27, No.3, 545/547, 1991
- [50] Jeff S.Shamma and Michael Athans: Guranteed Properties of Gain Scheduled Control for Linear Parameter-varyong Plants, *Automatica*, Vol.27, No.3, 559/564, 1991
- [51] Gang Tao and Petros A. Ioannou: Robust adaptive control plants with unknown order and high frequency gain, *INT.J.CONTROL*, Vol.53, No.3, 559/578, 1991
- [52] Oded Yaniv: Arbitrarily Small Sensitivity in Multiple-input-output Uncertain Feedback Systems, *Automatica*, Vol.27, No.3, 565/568, 1991
- [53] Yau-Tarng Juang: Robust Stability and Robust Pole Assignment of Linear Systems with Structured Uncertainty, *IEEE Trans.*, AC-36-5, 635/637, 1991
- [54] Jing-Chung Shen, Bor-Sen Chen and Fan-Chu Kung: Memoryless Stabilization of Uncertain Dynamic Delay Sstems: Riccati Equation Approach, *IEEE Trans.*, AC-36-5, 638/640, 1991
- [55] J.E.Ackermann and H.Z.Hu: Robustness of Sampled-data Control Systems with Uncertain Physical Plant Parameters, *Automatica*, Vol.27, No.4, 705/710, 1991
- [56] Gilead Tadmor: Uncertain Feedback Loops and Robustness in General Linear Systems, *Automatica*, Vol.27, No.6, 1039/1042, 1991
- [57] Theodore E.Djaferis: Finite Frequency Tests for Robust Performance of Systems with Real Parameter Uncertainty, *IEEE Trans.*, AC-36-12, 1477/1482, 1991
- [58] F.Jabbari and W.E.Schmitendorf: Robust Linear Controllers Using Observers, *IEEE Trans.*, AC-36-12, 1509/1514, 1991
- [59] Y.H.Chen: Decentralized Robust Control for -Scale Uncertain Systems:Large A Design Based on the Bound of Uncertain, *J.of DSMC Trans., ASME*, Vol.114, MARCH, 1/9, 1992

- [60] M.J.Grimble: LQG optimal control design for uncertain systems, *IEE Proc.,-D*, Vol.139, No.1, 21/30, 1992
- [61] Wen-June Wang and Chen-Fa Cheng: Stabilising controller and observer synthesis for uncertain Large-scale systems by the Riccati equation approach, *IEE Proc.,-D*, Vol.139, No.1, 72/78, 1992
- [62] Kazunobu Yoshida and Hisashi Kawabe: A Design of Saturating Control with a Guaranteed Cost and Its Application to the Crane Control Systems, *IEEE Trans.*, AC-37-1, 121/127, 1992
- [63] G. Leitmann: Guaranteed Asymptotic Stabilization for a Class of Uncertain Linear Dynamical Systems, *IEEE Trans.*, AC-34, (1991/12), 1973.
- [64] G. Leitmann: Guaranteed Asymptotic Stability for a Class of Uncertain Linear Dynamical Systems, *J. Optimiz. Theory Appl.*, 27, 69/106, 1979.
- [65] G. Leitmann: Guaranteed Asymptotic Stability for Linear Systems With Bounded Uncertainties, *Trans. ASME, J.DSMC*, 101-3, 217/218, 1979.
- [66] S. Stokich: Uncertain Dynamical Systems: A Lyapunov Min-Max Approach, *IEEE Trans.*, AC-34-3, 487/493, 1979.
- [67] G. Leitmann: On the Robustness of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems, *Trans. ASME, J.DSMC*, 102-2, 95/102, 1979.

非線形不確定システムのための制御則に関する論文

- [63] Costas Kravaris and Srinivasa Palanki: A Lyapunov Approach for Robust Non-linear State Feedback Synthesis, IEEE, AC-33-12, 1188/1191, 1988
- [64] A.Saberi and P.Sannuti: Global stabilization with almost disturbance decoupling of a class of nonlinear uncertain systems using output feedback, Proc. American Control Conf., Pittsburgh, Pennsylvania, WP8, 729/730, 1989
- [65] Jean-Paul Calvet and Y.Arkun: Stabilization of feedback linearized nonlinear processes under bounded perturbations, Proc. American Control Conf., Pittsburgh, Pennsylvania, WP8, 747/752, 1989
- [66] Y.H.Chen: State estimation for non-linear uncertain systems: a design based on properties related to the uncertainty bound, Int.J.Control, 52-5, 1131/1146, 1990
- [67] Saman Behravan: Robust output tracking for non-linear systems, Int.J.Control, 51-6, 1381-1407, 1990

Leitmann らによる制御則に関する論文

- [68] Yu.I.Aimov: On The Application of Lyapunov's Direct Method to Differential Equations with Ambiguous Right Sides, Automation and Remote Control, Vol.22, No.7, 713/725, 1961
- [69] H.L.Stalford and G.Leitmann: Sufficient Conditions for Optimality in Two-Person Zero-Sum Differential Games with State and Strategy Constraints, J. Mathematical Analysis Appl., 33-3, 650/654, 1971
- [70] S.Gutman and G.Leitmann: On a Class of Linear Differential Games, J. Optimiz. Theory Appl., 17-5/6, 511/522, 1975
- [71] S.Gutman and G.Leitmann: Stabilizing control for linear systems with bounded parameter and input uncertainty, Proceedings of the 7th IFIP Conference on Optimization Techniques, Nice, France; Springer-Verlag, Berlin, Germany, 729/755, 1975
- [72] S.Gutman and G.Leitmann: Stabilizing feedback control for dynamical systems with bounded uncertainty, Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, Gainesville, Florida, WA2, 94/99, 1976
- [73] G.Leitmann: Guaranteed Ultimate Boundedness for a Class of Uncertain Linear Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-23-6, 1109/1110, 1978
- [74] G.Leitmann: Guaranteed Asymptotic Stability for a Class of Uncertain Linear Dynamical Systems, J. Optimiz. Theory Appl., 27-1, 99/106, 1979
- [75] G.Leitmann: Guaranteed Asymptotic Stability for Some Linear System With Bounded Uncertainties, Trans. ASME, J.DSMC, 101-3, 212/216, 1979
- [76] S.Gutman: Uncertain Dynamical Systems-A Lyapunov Min-Max Approach, IEEE Trans., AC-24-3, 437/443, 1979
- [77] G.Leitmann: On the Efficacy of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems, Trans.ASME, J.DSMC, 102-2, 95/102, 1981

- [78] M.J. Corless and G. Leitmann: Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems, IEEE Trans., AC-26-5, 1139/1144, 1981
- [79] S. Gutman and Z. Palmor: Properties of min-max controllers in uncertain dynamical systems, SIAM J. Control Optimiz., 20-6, 850/861, 1982
- [80] M. Corless and G. Leitmann: Adaptive Control of Systems Containing Uncertain Functions and Unknown Functions with Uncertain Bounds, J. Optimiz. Theory Appl., 41-1, 155/168, 1983
- [81] E.P. Ryan and M. Corless: Ultimate Boundedness and Asymptotic Stability of a Class of Uncertain Dynamical via Continuous and Discontinuous Feedback Control, IMA, J. of Mathematical Control & Information, 1, 223/242, 1984
- [82] Y.H. Chen: Deterministic control for a new class of uncertain dynamical systems, Proc. 24th Conference on Decision and Control, TP3, 1302/1306, 1985
- [83] M. Corless and J. Manela: Control of uncertain discrete-time systems, Proc., American Control Conf., Seattle, Washington, WP7, 515/520, 1986
- [84] Y.H. Chen: Stabilization of uncertain systems using state detection and application to a maglev vehicle, Proc., American Control Conf., Seattle, Washington, WP7, 521/525, 1986
- [85] S.M. Madani-Esfahani, R.A. DeCarlo and S.H. Zak: On deterministic control of uncertain nonlinear systems, Proc. American Control Conf., Seattle, Washington, FA5, 1523/1528, 1986
- [86] Y.H. Chen: On the deterministic performance of uncertain dynamical systems, INT. J. CONTROL, Vol. 43, No. 5, 1557/1579, 1986
- [87] B.L. Walcott and S.H. Zak: State Observation of Nonlinear Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-32-2, 166/170, 1987
- [88] J.M. Kelly, G. Leitmann and A.G. Soldatos: Seismic protection of structures using base isolation and active control, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, FP3, 1885/1889, 1987

- [89] Y. Liu, M. Cheng and W.B. Gao: A New Control Method and Its Robustness for a Class of Nonlinear Systems, J. Optimiz. Theory Appl., 59-1, 117/133, 1988
- [90] Y.H. Chen: Design of Controllers for Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-33-5, 487/491, 1988
- [91] M. Corless and G. Leitmann: Controller design for uncertain systems via Lyapunov functions, Proc. American Control Conf., Atlanta, Georgia, FA12, 2019/2025, 1988
- [92] Y.H. Chen and S. Pandey: Robust control strategy for take-off performance in a windshear, Proc. American Control Conf., Atlanta, Georgia, FP6, 2244/2249, 1988
- [93] F. Garofalo and G. Leitmann: Guaranteeing Ultimate Boundedness and Exponential Rate of Convergence for a Class of Nominally Linear Uncertain Systems, Trans., ASME, J. of DSMC, 111, 584/588, 1989
- [94] M. Corless: Tracking Controllers for Uncertain Systems: Application to a Manutec R3 Robot, Trans., J. of DSMC, 111, 609/618, 1989
- [95] D. Da, M. Corless and F. Garofalo: Guaranteed exponential convergence for uncertain nonlinear systems in the presence of singular perturbations, Proc. American Control Conf., Pittsburgh, Pennsylvania, TA-6, 1154-1159, 1989
- [96] E. Cheres, S. Gutman and Z.J. Palmor: Stabilization of Dynamic Systems Including State Delay, IEEE, AC-34-11, 1199/1203, 1989
- [97] C.H. Chao and H.L. Stalford: Necessary and Sufficient Condition in Lyapunov Robust Control: Multi-Input Case, J. of Opt. Theory and Applications, 66-1, 1/21, 1990
- [98] E. Cheres, Z.J. Palmor and S. Gutman: Min-Max Predictor Control for Uncertain Systems with Input Delays, IEEE, Trans., AC-35-2, 210/214, 1990
- [99] A.A. Bahnasawi, A.S. Al-Fuhaid and M.S. Mahmoud: Decentralised and hierarchical control of interconnected uncertain systems, IEE Proc, 137-5, 311/321, 1990

- [100] M. Corless: Guaranteed Rates of Exponential Convergence for Uncertain Systems, *J. of Opt. Theory and Applications*, 64-3, 481/494, 1990
- [101] Shun-Chuan Tsay, I-Kong Fong and Te-Son Kuo: Robust linear quadratic optimal control for systems with linear uncertainties, *Int. J. Control*, 53-1, 81/96, 1991
- [102] Y.H. Chen: Decentralized Adaptive Robust Control Design: The Uncertain is Time Varying, *Trans., ASME, J. of DSMC*, Vol.113, 515/518, 1991
- [103] Keqin Gu and Y.H. Chen: Linear Control Guaranteeing Stability of Uncertain Systems via Orthogonal Decomposition, *Automatica*, Vol.27, No.5, 873/876, 1991
- [104] Y.H. Chen, G. Leitmann and Xiong Zhong Kai: Robust control design for interconnected systems with time-varying uncertainties, *INT. J. CONTROL*, Vol.54, No.5, 1119/1142, 1991

Leitmann らによる制御則をマンピュレータに適用した論文

- [105] E.P. Ryan, G. Leitmann and M. Corless: Practical Stabilizability of Uncertain Dynamical Systems: Application to Robotic Tracking, *J. Optimiz. Theory Appl.*, 47-2, 235/252, 1985
- [106] G. Ambrosino, G. Celentano and F. Garofalo: Robust Model Tracking Control for a Class of Nonlinear Plants, *IEEE Trans.*, AC-30-3, 275/279, 1985
- [107] G. Ambrosino, G. Celentano and F. Garofalo: Decentralized PD controllers for tracking control of uncertain multivariable systems, *Proc. IFAC*, York, UK, 1907/1911, 1985
- [108] G. Ambrosino, G. Celentano and F. Garofalo: Tracking Control of High-Performance Robots via Stabilizing Controllers for Uncertain Systems, *J. Optimiz. Theory Appl.*, 50-2, 239/255, 1986

- [109] R. Shoureshi, M.J. Corless and M.D. Roesler: Control of Industrial Manipulators with Bounded Uncertainties, *Trans. ASME, J. DSMC*, 109-1, 53/59, 1987
- [110] Y.H. Chen: Adaptive Robust Model-Following Control and Application to Robot Manipulators, *Trans. ASME, J. DSMC*, 109-3, 209/215, 1987
- [111] R. Shoureshi, M.E. Momot and M.D. Roesler: Robust Control for Manipulators with Uncertain Dynamics, *Proc. IFAC*, Congress, Munich, 14.6-5, 358/363, 1987
- [112] R. Horowitz, H.I. Stephens and G. Leitmann: Experimental verification of a deterministic controller for a D.C. Motor with uncertain dynamics, *American Control Conf.*, Minneapolis, Minnesota, FP3, 1900/1907, 1987
- [113] M. Hached, M.M. Esfahani and S.H. Zak: Stabilization of Uncertain Systems Subject to Hard Bounds on Control with Application to a Robot Manipulator, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.4, No.3, 310/323, 1988
- [114] Y.H. Chen and V.A. Eyo: Robust computed torque control of mechanical manipulators: non-adaptive vs. adaptive, *Proc. American Control Conf.*, Atlanta, Georgia, TP3, 1327/1332, 1988
- [115] 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*, 111-6, 244/252, 1989
- [116] J.K. Mills and A.A. Goldenberg: Robust Control of Robotic Manipulators in the Presence of Dynamic Parameter Uncertainty, *Trans. ASME, J. of DSMC*, Vol.111, sep, 444/451, 1989
- [117] M. Corless: Tracking Controllers for Uncertain Systems: Application to a Manutec R3 Robot, *Trans., J. of DSMC*, 111, 609/618, 1989
- [118] Y.H. Chen and Chieh Hsu: Nonlinear robust control applied to a two degree of freedom scara manipulator, *Proc. American Control Conf.*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1452/1456, 1989
- [119] C.G. Kang, G. Leitmann and R. Horowitz: Robust Deterministic Controller Design of a Two Degree of Freedom SCARA Manipulator, *Proc. American Control Conf.*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1457/1462, 1989

- [120] Y.H.Chen and S.Pandey: Uncertainty Bound-Based Hybrid Control for Robot Manipulators, IEEE Trans., RA-6-3, 303/311, 1990
- [121] R.Shoureshi, M.E.Momot and M.D.Roesler: Robust Control of Manipulators with Uncertain Dynamics, Automatica, 26-2, 353/359, 1990
- [122] Y.H.Chen: Robust Computed Torque Schemes for Mechanical Manipulators: Nonadaptive Versus Adaptive, Trans. of ASME, J. of DSMC, Vol.113, June, 324/327, 1991
- [123] Zhihua Qu and John Dorsey: Robust Tracking Control of Robots by a Linear Feedback Law, IEEE, Trans., AC-36-9, 1081/1084, 1991
- [124] Li-Chen Fu: Robust Adaptive Decentralized Control of Robot Manipulators, IEEE Trans., AC-37-1, 106/110, 1992

マッチング条件を緩和する論文

- [125] B.R Barmish and G.Leitmann: On Ultimate Boundedness Control of Uncertain Systems in the Absence of Matching Assumptions, IEEE Trans., AC-27-1, 153/158, 1982
- [126] S.N.Singh and A.A.R.Coelho: Ultimate boundedness control of set points of mismatched uncertain linear systems, Int.J.Systems Sci.,14-7, 693/710, 1983
- [127] S.N.Singh and A.A.R.Coelho: Nonlinear Control of Mismatched Uncertain Linear Systems and Application to Control of Aircraft, Trans. ASME, J.DSMC, 106, 203/210, 1984
- [128] I.R.Petersen: Structural stabilization of uncertain systems: necessity of the matching condition, SIAM J.Control and Optimiz., 23-2, 286/296, 1985

- [129] R.K.Yedavalli and Z.Liang: Reduced Conservatism in the Ultimate Boundedness Control of Mismatched Uncertain Linear Systems, Trans.ASME, J.DSMC, 109-1, 1/6, 1987
- [130] Y.H.Chen: On the Robustness of Mismatched Uncertain Dynamical Systems, Trans. ASME, J.DSMC, 109-1, 29/35, 1987
- [131] Y.H.Chen and G.Leitmann: Robustness of uncertain systems in the absence of matching assumptions, Int.J.Control, 45-5, 1527/1542, 1987
- [132] In-Joong Ha: New Matching Conditions for Output Regulation of a Class of Uncertain Nonlinear Systems, IEEE, Trans., AC-34-1, 116/119, 1989
- [133] S.H.Žak: On the Stabilization and Observation of Nonlinear/Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans., AC-35-5, 604/607, 1990
- [134] Zhihua Qu and John Dorsey: Robust Control of Generalized Dynamic Systems Without the Matching Conditions, J.of DSMC, Trans., ASME, Vol.113, Dec., 582/589, 1991

可変構造制御則に関する論文

- [135] B.Draženović: The Invariance Conditions in Variable Structure Systems, *Automatica*, Vol.5, 287/295, 1969
- [136] V.I.Utkin: Equations of the slipping region in discontinuous systems.1, *Automation and Remote Control*, 1897/1907, 1971
- [137] V.I.Utkin: Equations of the slipping regime in discontinuous systems.2, *Automation and Remote Control*, 211/219, 1972
- [138] J.Erschler, F.Roubellat and J.P.Vernhes: Automation of a Hydroelectric Power Station Using Variable-Structure Control Systems, *Automatica*, Vol.10, 31/36, 1974
- [139] F.M.Devaud and J.Y.Caron: Asymptotic Stability of Model Reference Systems with Bang-Bang Control, *IEEE Trans.*, AC-20, 694/696, 1975
- [140] V.I.Utkin: Variable Structure Systems with Sliding Modes, *IEEE Trans.*, AC-22-2, 212/222, 1977
- [141] K.K.D.Young: Design of Variable Structure Model-Following Control Systems, *IEEE,Trans.*,AC-23-6, 1079/1085, 1978
- [142] V.I.Utkin and K.D.Yang: Methods for constructing discontinuity planes in multidimensional variable structure systems, *Automation and Remote Control*, 39, 1466/1470, 1978
- [143] O.M.E.El-Ghezawi, A.S.I.Zinober, D.H.Owens and S.A.Billings: Computation of the zero directions of linear multivariable systems, *INT.J.CONTROL*, Vol.36, No.5, 833/843, 1982
- [144] O.M.E.El-Ghezawi, A.S.I.Zinober and S.A.Billings: Analysis and design of variable structure systems using a geometric approach, *INT.J.CONTROL*, Vol.38, No.3, 657/671, 1983
- [145] V.I.Utkin: Variable structure systems: present and future, *Automation Remote Control*, (12), 1105/1120, 1983

- [146] E.P.Ryan: A variable structure approach to feedback regulation of uncertain dynamical systems, *INT.J.CONTROL*, Vol.38, No.6, 1121/1134, 1983
- [147] J.J.E.Slotine: Sliding controller design for non-linear systems, *Int.J.Control*, 40-2, 421/434, 1984
- [148] A.Y.Sivaramakrishnan, M.V.Hariharan and M.C.Srisailam: Design of variable-structure load-frequency controller using pole assignment technique, *INT.J.CONTROL*, Vol.40, No.3, 487/498, 1984
- [149] G.Ambrosino, G.Celentano and F.Garofalo: Variable structure model reference adaptive control systems, *Int.J.Control*, 39-6, 1339/1349, 1984
- [150] O.Kaynak and F.Harashima: Disturbance Rejection by Means of a Sliding Mode, *IEEE Trans.*, IE-32, No.1, 85/87, 1985
- [151] C.Milosavljevic: General conditions for the existence of a quasisliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems, *Automatic Control and Computers*, 46-3-1, 307/314, 1985
- [152] P.P.Aslin, R.J.Patton and C.M.Dorling: The design of a sliding mode controller for dutch roll damping in a non-linear aircraft system, *Proc.*, IEE Control85, Conference Publication Number 252, 435/439, 1985
- [153] C.M.Dorling and A.S.I.Zinober: Two approaches to hyperplane design in multivariable variable structure control systems, *Int.J.Control*, 44-1, 65/82, 1986
- [154] F.Harashima, H.Hashimoto and K.Maruyama: Sliding Mode Control of Manipulator with Time-Varying Switching Surfaces, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.22, No.3, 335/342, 1986
- [155] J.A.Burton and A.S.I.Zinober: Continuous approximation of variable structure control, *Int.J.Systems Sci.*, 17-6, 875/885, 1986
- [156] H.P.Opitz: Robustness properties of discrete-variable structure controllers, *Int.J.Control*, 43-3, 1003/1014, 1986
- [157] H.Sira-Ramirez and T.A.W.Dwyer: Sliding regions on slow manifolds of systems with fast actuators, *Proc. American Control Conf.*, Minneapolis, Minnesota, WA3, 78/83, 1987

- [158] S.Jayasuriya and Seung-Bok Choi: On the sufficiency condition for existence of a stable sliding mode, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, WA-3, 84/89, 1987
- [159] S.M.M.Esfahani and S.H.Žak: Variable structure control of dynamical systems with bounded controllers, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, WA-3, 90/95, 1987
- [160] G.P.Matthews, C.DeMarco and Ray A.DeCarlo: A Decentralized Variable Structure Control Design For Two Interconnected Synchronous Machines, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, WA3, 96/101, 1987
- [161] M.A.Zohdy, J.Liu and N.K.Loh: Model reference variable structure switched-mode regulators, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, WA-3, 102/106, 1987
- [162] G.E.Young and S.Rao: Robust Sliding-Mode Control of a Nonlinear Process With Uncertainty and Delay, Trans.ASME, J.of DSMC, 109-3, 203/208, 1987
- [163] J.J.E.Slotine, J.K.Hedrick and E.A.Misawa: On Sliding Observers for Nonlinear Systems, J.of DSMC, 109, 245/252, 1987
- [164] P.Feller and U.Benz: Sliding mode position control of a DC motor, Proc. IFAC, Congress, Munich, 3.2-1, 325/330, 1987
- [165] H.G.Kwatny and T.L.Siu: Chattering in variable structure feedback systems, Proc. IFAC, Congress, Munich, 14.6-5, 334/341, 1987
- [166] W.Hejmo: A Variable structure system of positional control independent of parameter variations, Proc. IFAC, Congress, Munich, 14.6-5, 342/347, 1987
- [167] Yu.Xing-Huo and F.Chun-Bo: A Lyapunov-function approach for the design of variable-structure systems, Proc. IFAC, Congress, Munich, 14.6-5, 348/352, 1987
- [168] Y.Shan: Synthesis of variable structure systems in frequency domain, Proc. IFAC, Congress, Munich, 14.6-5, 353/357, 1987
- [169] 安田, 伊藤, 平井: デジタル制御によるすべり動作制御系の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.5, 478/484, 1987

- [170] S.Z.Sarpturk, Y.Istefanopulos and O.Kaynak: On the Stability of Discrete-Time Sliding Mode Control Systems, IEEE Trans., AC-32, No.10, 930/932, 1987
- [171] H.S.Tan and Y.K.Chin: Variable-Structure Vehicle Traction Control, Trans. ASME, 88-WA/DSC-27, 1988
- [172] 安田, 杉山, 平井: 可変構造制御による多変数サーボ系の速応性の改善, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.2, 134/140, 1988
- [173] D.Cho and J.K.Hedrick: Sliding Mode Fuel-Injection Controller: Its Advantages, Trans. ASME, 88-WA/DSC-38, 1988
- [174] 疋田, 川島: 型を考慮したすべり状態サーボ系, 日本機械学会論文集C編, Vol.54, No.497, 183/188, 1988
- [175] Giuseppe S.Buja and Alexander Souliaev: A Variable-Structure Controller, IEEE Trans., AC-33-2, 206/209, 1988
- [176] R.A.Decarlo, S.H.Žak and G.P.Matthews: Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial, Proc. IEEE, 76-3, 212/232, 1988
- [177] 大槻, 平井, 河内, 榊: 定速動作を行うスライディングモードサーボ系と高速プリンタへの応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.7, 723/729, 1988
- [178] H.Sira-Ramirez: Differential geometric methods in variable-structure control, Int.J.Control, 48-4, 1359/1390, 1988
- [179] 成田, 疋田: 連続可変構造制御によるロバストサーボ系, 日本機械学会論文集C編, Vol.54, No.503, 1489/1493, 1988
- [180] C.M.Dorling and A.S.I.Zinober: Robust hyperplane design in multivariable variable structure control systems, Int.J.Control, 48-5, 2043/2054, 1988
- [181] G.Bartolini and T.Zolezzi: Asymptotic linearization of uncertain systems by means of approximate sliding modes, Proc. IFAC, Congress, Capri, Italy, 106/110, 1989
- [182] R.Suarez and J.Alvarez: Sliding control of nonlinear stabilizable systems, Proc. IFAC, Congress, Capri, Italy, 111/116, 1989

- [183] L.Ning-Su and F.Chun-Bo: A new method for suppressing chattering in variable structure feedback control systems, Proc. IFAC, Congress, Capri, Italy, 117/122, 1989
- [184] J.Xu, H.Hashimoto and F.Harashima: On Design of VSS Observer for Nonlinear Systems, Trans.of the SICE, 25-2, 152/158, 1989
- [185] S.V.Drakunov and V.I.Utkin: On discrete-time sliding modes, Proc. IFAC, Congress, Capri, Italy, 484/489, 1989
- [186] 古田, 森貞: 離散系のスライディングモードコントロール, 計測自動制御学会論文誌, Vol.25, No.5, 574/578, 1989
- [187] S.P.Chan and W.B.Gao: Approach algorithm for smooth tracking with variable structure controller, Proc. American Control Conf., Pittsburgh, Pennsylvania, WP8, 706/711, 1989
- [188] H.Sira-Ramirez: Nonlinear Variable Structure Systems in Sliding Mode: The General Case, IEEE Trans., AC-34-11, 1186/1188, 1989
- [189] F.J.Chang, S.H.Twu and Shyang Chang: Adaptive chattering alleviation of variable structure systems control, IEE Proc., 137-1, 31/39, 1990
- [190] Xu Xiaohao, Wu Yaohua and Huang Wenhui: Variable-structure control approach of decentralised model-reference adaptive systems, IEE Proc., 137-5, 302/306, 1990
- [191] S.K.Spurgeon and R.J.Patton: Robust variable structure control of model reference systems, IEE Proc., 137-6, 341/348, 1990
- [192] S.M.Madani-Esfahani, M.Hached and S.H.Žak: Estimation of Sliding Model Domains of Uncertain Variable Structure Systems with Bounded Controllers, IEEE Trans., AC-35-4, 446/449, 1990
- [193] Li-Chen Fu and Teh-Lu Liao: Globally Stable Robust Tracking of Nonlinear Systems Using Variable Structure Control and with an Application to a Robotic Manipulator, IEEE Trans. AC-35-12, 1345/1350, 1990

- [194] 川田, 増淵: 外部に熱交換器をもつバッチ反応器のモデリングと可変構造制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.12, 1399/1405 (1990)
- [195] S.V.Yallapragada and B.S.Heck: Reaching Conditions in Variable Structure Systems for Output Feedback Control, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 32/36, 1991
- [196] E.Yaz and A.Azemi: Variable Structure Observers for Nonlinear Models with Unbounded Noise and Measurement Uncertainties, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 43/48, 1991
- [197] L.-Wey Chang: A Robust Motion Control of Actuators in Disk Files, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 49/53, 1991
- [198] L.Wey Chang: A Versatile Sliding Control with a Second-Order Sliding Condition, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 54/55, 1991
- [199] H.Elmali and N.Olgac: Robust output tracking of nonlinear mimo systems via sliding mode technique, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 56/57, 1991
- [200] H.J.Sira-Ramirez: An Extended Linearization Approach to Sliding Mode Control of Nonlinear Systems, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 58/59, 1991
- [201] Kai S.Yeung and C.-C.Cheng: Realizing linear controllers with strong derivative actions using sliding mode technique, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WA2, 60/61, 1991
- [202] S.K.Spurgeon: Choice of discontinuous control component for robust sliding mode performance, Int. J. Control, 53-1, 163/179, 1991
- [203] Han-Shue Tan and Yuen-Kwok Chin: Vehicle Traction Control: Variable-Structure Control Approach, Trans. ASME, J.of DSMC, Vol.113, 223/230, 1991
- [204] T.-L.Chern and Y.-C.Wu: Design of integral variable structure controller and application to electrohydraulic velocity servosystems, IEE Proc., Vol.138, No.5, 439/444, 1991

- [205] N.Olgac, B.E.Platin and J.-M.Chang: Sliding mode control of remotely operated vehicles for horizontal plane motions, IEE Proc., Vol.138, No.5, 469/473, 1991
- [206] D.S.Lee, M.G.Kim, H.K.Kim and M.J.Youn: Controller design of multivariable structure systems with nonlinear switching surfaces, IEE Proc.-D, Vol.138, No.5, 493/499, 1991
- [207] 陳, 美多: 適応V S Sオブザーバを利用したスライディングモード制御, 電気学会論文誌C編, Vol.111, No.3, 514/522, 1991
- [208] D.Das, M.L.Kothari, D.P.Kothari and J.Nanda: Variable structure control strategy to automatic generation control of interconnected reheat thermal system, IEE Proc., Vol.138, No.6, 579/585, 1991
- [209] B.M.Diong and J.V.Medanic: Dynamic output feedback variable structure control for system stabilization, American Control Conference, Boston, Massachusetts, WP4, 609/614, 1991
- [210] F.Esfandiari and H.K.Khalil: Stability Analysis of a Continuous Implementation of Variable Structure Control, IEEE Trans., AC-36-5, 616/620, 1991
- [211] S.J.Dodds and A.B.Walker: Sliding-mode control system for the three-axis attitude control of rigid-body spacecraft with unknown dynamics parameters, INT.J.CONTROL, vol.54, no.4, 737/761, 1991
- [212] S.Sangwongwanich, T.Yonemoto, T.Furuhashi and S.Okuma: A Sliding Observer for Robust Flux Estimation of Induction Motors and Its Characteristics, Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, 27-7, 792/799, 1991
- [213] L-Wey Chang: A MIMO Sliding Control with a First-order plus Integral Sliding Condition, Automatica, Vol.27, No.5, 853/858, 1991
- [214] C.Canudas De Wit and J.-J.E.Slotine: Sliding Observers for Robot Manipulators, Automatica, Vol.27, No.5, 859/864, 1991
- [215] H S-Ramirez: Non-linear discrete variable structure systems in quasi-sliding mode, INT.J.CONTROL, Vol.54, No.5, 1171/1187, 1991

- [216] F.Zhou and D.G.Fisher: MIMO Sliding mode control: a lyapunov approach, American Control Conference, Boston, Massachusetts, TP7, 1796/1799, 1991
- [217] E.J.Lewandowski and J.J.Moskwa: On Guaranteeing Global Stability with Sliding Mode Control, Theory and Experiment, American Control Conference, Boston, Massachusetts, TP14, 2077/2082, 1991
- [218] C.K.Kao and A.Sinha: Sliding Mode Control of Vibration in Flexible Structures Using Estimated States, American Control Conference, Boston, Massachusetts, FA11, 2467/2474, 1991
- [219] L.Poslavsky and J.C.Kantor: Sliding Mode Control of an Exothermic Continuous Stirred Tank, American Control Conference, Boston, Massachusetts, FP7, 2872/2878, 1991
- [220] S.V.Emelyanov, S.K.Korovin, A.L.Nersisian and Yu.E.Nisenzon: Output feedback stabilization of uncertain plants: a variable structure systems approach, INT.J.CONTROL, Vol.55, No.1, 61/81, 1992
- [221] Hakan Elmali and Nejat Olgac: Robust Output Tracking of Nonlinear MIMO Systems via Sliding Mode Technique, Automatica, Vol.28, No.1, 145/151, 1992
- [222] Kumpati S.Narendra and Jovan D.Boskovic: A Combined Direct, Indirect, and Variable Structure Method for Robust Adaptive Control, IEEE Trans., AC-37-2, 262/268, 1992
- [223] Fengxi Zhou and D.Grant Fisher: Continuous sliding mode control, INT.J.COMTROL, Vol.55, No.2, 313/327, 1992
- [224] S.K.Spurgeon: Hyperplane design techniques for discrete-time variable structure control systems, INT.J.CONTROL, Vol.55, No.2, 445/456, 1992
- [225] D.S.Yoo and M.J.Chung: A Variable Structure Control with Simple Adaptation Laws for Upper Bounds on the Norm of the Uncertainties, IEEE, Trans., AC-37-6, 860/865 1992

マニピュレータにおける可変構造制御則の論文

- [226] K.K.D.Young: Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, SMC-8-2, 101/109, 1978
- [227] J.J.E.Slotine and S.S.Sastry: Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators, Int.J.Control, 38-2, 465/492, 1983
- [228] R.G.Morgan and U.Ozguner: A Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators, IEEE, RA-1-1, 57/65, 1985
- [229] F.Harashima, H.Hashimoto and S.Kondo: MOSEFT Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control, IEEE Trans., IE-32-3, 238/244, 1985
- [230] M.Hiroi, M.Hojo, Y.Hashimoto, Y.Abe and Y.Dote: Microprocessor-Based Decoupled Control of Manipulator Using Modified Model-Following Method with Sliding Mode, IEEE Trans., IE-33-2, 110/113, 1986
- [231] H.Hashimoto, K.Maruyama and F.Harashima: A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode, IEEE Trans., IE-34-1, 11/18, 1987
- [232] H.Hashimoto and F.Harashima: Variable structure strategy in motion control—Industrial Applications—, Proc. IFAC, Congress, Munich, 1.4-2, 57/62, 1987
- [233] N.Chen and T.A.W.Dwyer: Single Step Optimization of Manipulator Maneuvers with Variable Structure Control, Proc. American Control Conf., Minneapolis, Minnesota, WA-3, 107/112, 1987
- [234] S.B.Choi and S.Jayasuriya: A Sliding mode controller incorporating matching conditions applied to manipulators, Proc. IFAC, Congress, Munich, 8.2-3, 290/295, 1987
- [235] Kai S.Yeung and Yon P.Chen: A New Controller Design for Manipulators Using the Theory of Variable Structure Systems, IEEE Trans, AC-33-2, 200/206, 1988
- [236] K-K.David Young: A Variable Structure Model Following Control Design for Robotics Applications, IEEE Trans., RA-4-5, 556/561, 1988
- [237] K.D.Young: Application of sliding mode to constrained robot motion control, Proc. American Control Conf., Atlanta, Georgia, TA-3, 912/917, 1988

- [238] 則次, 和田, 石田: 適応可変構造制御法による空気圧駆動ロボットの制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.2, 200/207, 1989
- [239] T.A.W.Dwyer,III and J.Kim: Bandwidth-Limited Robust Nonlinear Sliding Control of Pointing and Tracking Maneuvers, Proc. American Control Conf., Pittsburgh, Pennsylvania, TA6, 1131/1135, 1989
- [240] 真野, 岩井, 大友: スライディングオブザーバを用いた多関節マニピュレータに対する外乱ロバスト制御系の構成, 日本機械学会論文集C編, Vol.55, No.518, 2540/2546, 1989
- [241] 美多, 陳: スライディングモード制御とロボットアームの軌道制御, システム/制御/情報, Vol.34, No.1, 50/55, 1990
- [242] Zoran R.Novakovic and Bojan Nemec: A Solution of the Inverse Kinematics Problem Using the Sliding Mode, IEEE Trans., RA-6-2, 247/252, 1990
- [243] 則次, 和田, 田寺: スライディングモード制御法を用いた空気圧駆動ロボットの位置と力のハイブリッド制御, Vol.26, No.3, 331/338, 1990
- [244] Yi-Feng Chen, T.Mita and S.Wakui: A New and Simple Algorithm for Sliding Mode Trajectory Control of the Robot Arm, IEEE Trans., AC-35-7, 828/829, 1990
- [245] Y.P.Chen and K.S.Yeung: Sliding-mode control of multi-link flexible manipulators, INT.J.CONTROL, Vol.54, No.2, 257/278, 1991
- [246] Tin-Pui Leung, Qi-Jie Zhou and Chun-Yi Su: An Adaptive Variable Structure Model Following Control Design for Robot Manipulators, IEEE Trans., AC-36-3, 347/353, 1991
- [247] P.J.Nathan and S.N.Singh: Sliding Mode Control and Elastic Mode Stabilization of a Robotic Arm With Flexible Links, J.DSMC, Trans., ASME, Vol.113, Dec., 669/676, 1991
- [248] W.T.Qian and C.C.H.Ma: A New Controller Design for a Flexible One-Link Manipulator, IEEE Trans., AC-37-1, 132/137, 1992

- [249] T.-L.Chern and Y.-C.Wu: Integral variable structure control approach for robot manipulators, IEE Proc.-D, Vol.139, No.2, 161/166, 1992
- [250] S.R.Habibi and R.J.Richards: Sliding mode control of an electrically powered industrial robot, IEE Proc.-D, Vol.139, No.2, 207/225, 1992
- [251] S.V.Drakunov and V.I.Utkin: Sliding mode control in dynamic systems, INT.J.CONTROL, Vol.55, No.4, 1029/1037, 1992

発表論文

1. 査読付き論文

- [P-1] 坂本, 増淵, 川田: 不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御則 (チャタリングを低減させる仮想目標点の提案), 計測自動制御学会論文集, Vo.28, No.3, 351/357, 1992
- [P-2] N.Sakamoto, M.Masubuchi: Reduction of input chattering of a robust controller for uncertain linear systems — A proposal of Fictitious Set Point —, 2nd IFAC Workshop on System Structure and Control, Prague, Czechoslovakia, 296/299, 1992
- [P-3] 坂本, 増淵: 不確かさをもつ2リンクマニピュレータに対する仮想目標値によるロバスト制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.59, No.558, 481/486, 1993
- [P-4] 坂本, 増淵, 川田: 仮想目標値の概念を適用したV S C — あるバッチ反応プロセスの温度制御 —, 計測自動制御学会, (査読中)

2. 学会発表

- [S-1] 坂本, 増淵, 川田: 不確かさをもつシステムに対するロバスト制御則についての一提案, 第32回自動制御連合講演会 (1021), 電気通信大学, 東京, 10.5, 1989
- [S-2] 坂本, 増淵: パラメータ変動をもつロボットアームのロバスト制御則についての一提案, 日本機械学会ロボティクス部門企画, ロボティクスメカトロニクス講演会'90, 南大阪地域地場産業振興センター, 大阪, 6.9, 1990
- [S-3] 坂本, 増淵, 川田: 不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御則 (仮想目標点の提案), 第29回計測自動制御学会学術講演会 (JS 5-4), 東京大学工学部, 東京, 7.24, 1990
- [S-4] 坂本, 増淵: 仮想目標点の概念を用いた弾性ジョイントをもつアームのロバスト制御, 第33回自動制御連合講演会 (2006), 京大会館, 京都, 11.15, 1990

- [S-5] 坂本, 増淵: 不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御 (チャタリングの低減化について), 第 13 回 Dynamical System Theory シンポジウム, 東京商船大学, 東京, 1.23, 1991
- [S-6] 坂本, 増淵: 離散値システムにおけるチャタリングを低減させる V S C の考案, 第 20 回 制御理論シンポジウム, N T T 東海セミナーセンター, 刈谷市, 5.30, 1991
- [S-7] 坂本, 増淵: 新しいマッチング条件による不確定システムのための V S C の提案, 第 30 回 計測自動制御学会学術講演会 (JS 47-4), 山形大学工学部, 山形, 7.19, 1991
- [S-8] 坂本, 増淵: 仮想目標値によるチャタリングの低減化 — V S C への適用 —, 第 34 回 自動制御連合講演会 (1019), 慶応大学, 神奈川, 11.20, 1991
- [S-9] 坂本, 増淵: 不確かさをもつ 2 リンクマニピュレータに対する仮想目標値によるロバスト制御, 日本機械学会ロボティクス部門企画, ロボティクスメカトロニクス講演会 '92, 川崎市産業振興会館, 神奈川, 6.17, 1992
- [S-10] 坂本, 増淵: 仮想目標値の概念を適用した V S C — ある重合反応の温度制御 —, 第 31 回 計測自動制御学会学術講演会 (DS 52-4), 熊本大学, 熊本, 7.24, 1992
- [S-11] 坂本, 増淵: アナログ計算機による V S C のチャタリングについて, 第 35 回 自動制御連合講演会 (1019), 岡山カルチャーホテル, 岡山, 10.29, 1992
- [S-12] 坂本, 増淵: バッチプロセスの可変構造制御則による温度追従制御, 第 1 回 制御理論応用シンポジウム, 東京工業大学, 東京, 4.22, 1993 (講演予定)

3. 学内発表

- [U-1] 坂本, 増淵: 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 —, 法政大学工学部研究集報 (第 28 号)



0004.jp2	目次 / p1
0006.jp2	1 序論 / p5
0006.jp2	1.1 不確かさを含むシステム / p5
0009.jp2	1.2 不確かさを含むシステムのための制御則 / p10
0010.jp2	1.3 Leitmannらによる制御則について / p13
0011.jp2	1.4 可変構造制御則(VSC)について / p15
0013.jp2	1.5 上記制御則の問題点 / p19
0014.jp2	1.6 チャタリングを低減するための従来の研究と問題点 / p20
0015.jp2	1.7 本研究の目的と構成 / p23
0017.jp2	2 仮想目標値による不確かさを含む線形システムの制御 / p26
0017.jp2	2.1 はじめに / p26
0017.jp2	2.2 不確かさを含む線形システムの制御 / p27
0020.jp2	2.3 仮想目標値の導入 / p32
0020.jp2	2.4 仮想目標値を適用した制御則の安定性 / p33
0021.jp2	2.5 例題 / p35
0023.jp2	2.6 まとめ / p38
0024.jp2	3 可変構造制御則における仮想目標値の役割 / p41
0024.jp2	3.1 はじめに / p41
0025.jp2	3.2 Leitmannらによる制御則と可変構造制御則の類似点と相違点 / p42
0026.jp2	3.3 新しい仮想目標値のアルゴリズム / p45
0030.jp2	3.4 不確定システムに対する可変構造制御則への適用 / p53
0031.jp2	3.5 まとめ / p54
0031.jp2	4 不確かさを含むマニピュレータの仮想目標値によるロバスト制御 / p55
0031.jp2	4.1 はじめに / p55
0032.jp2	4.2 2リンクマニピュレータ / p56
0033.jp2	4.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則 / p58
0035.jp2	4.4 シミュレーション結果 / p63
0036.jp2	4.5 まとめ / p65
0039.jp2	5 仮想目標値によるバッチ反応プロセスの温度追従制御 / p70
0039.jp2	5.1 はじめに / p70
0039.jp2	5.2 バッチ反応プロセスと従来の制御 / p71
0040.jp2	5.3 仮想目標値を適用した可変構造制御則による制御 / p73
0043.jp2	5.4 ロバスト性の検討 / p79
0043.jp2	5.5 まとめ / p79
0046.jp2	6 アナログ計算機による操作量のチャタリングの検討 / p84
0046.jp2	6.1 はじめに / p84
0047.jp2	6.2 シミュレーションのための例題 / p87
0048.jp2	6.3 デジタル計算機によるシミュレーション結果 / p88
0048.jp2	6.4 アナログ計算機によるシミュレーション結果 / p89
0048.jp2	6.5 考察 / p89
0049.jp2	6.6 まとめ / p90
0052.jp2	7 結論 / p96
0053.jp2	謝辞 / p98
0054.jp2	文献 / p100
0066.jp2	発表論文 / p125