

簡素なスイッチ力学系の周期点探索と安定化

居波, 正樹 / INAMI, Masaki

(発行年 / Year)

2014-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2014-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2 0 1 4 年度 修士論文

論文題名
簡素なスイッチ力学系の周期点探索と安定化

指導教授 齋藤 利通 教授

法政大学大学院工学研究科
電気工学専攻修士課程

学生証番号： 12R3102

イナミ マサキ
氏名 居波 正樹

あらまし

本修士論文では、簡素なスイッチ力学系が呈する現象について考察する。スイッチ力学系とは、複数の力学系がスイッチによって切りかわる系である。この系は、カオスや概周期解、安定周期現象など、様々な現象を呈することが知られている。また、インバータ回路や睡眠覚醒現象などに関係があり、これらの安定性を解析することは工学的にも重要である。まずはじめに、周期しきい値のみをもつスイッチ力学系の解析を行う。ここでは一次元位相マップを用いて系の動作を解析する。また系が呈する安定周期やトラスなどの現象がどのパラメータ領域で起こるかを明らかにする。

次に、周期しきい値に、強制スイッチを付加した系を考える。強制スイッチとは同一位相において傾きを強制的に負に切り替えることを指す。このスイッチングルールを加えることにより一次元位相マップを状態変数によって定義できる。これにより、次章で考察を行う不動点探索法の適用をスムーズに行うことができる。またスイッチングルールを付加することにより、カオスなどのより多彩な現象を呈する。

最後に、二分法を基にした探索 + 安定化法を適用する。

Abstract

This thesis considers the phenomenon which a simple switch dynamical system. A switch dynamical system is a system which cuts and changes two or more dynamical systems with a switch. It is known that this system will present various phenomena, such as chaos, torus and a stable periodical phenomenon. Moreover, also in engineering, it is important for it to be related to an inverter circuit, a sleep awakening phenomenon, etc., and to analyze such stability. First, a switch dynamical system only with a periodic threshold is analyzed. Here, operation of a system is analyzed using a one-dimensional phase map. Moreover, it is shown clearly in which parameter domain phenomena which a system presents, such as a stable cycle and Taurus, happen. Next, the system which added the compulsive switch to the periodic threshold is considered. A compulsive switch refers to changing inclination negatively compulsorily in the same phase. A state variable can define a one-dimensional phase map by adding this switching rule. Thereby, the periodic point exploring method for considering in the following chapter is smoothly applicable. Moreover, more variegated phenomena, such as chaos, are presented by adding a switching rule. Finally, exploring and stabilization process based on bisection method.

目次

第1章	まえがき	6
1.1	スイッチ力学系	6
1.2	カオス制御	7
第2章	簡素なスイッチ力学系	11
2.1	まえがき	11
2.2	系の定義	11
2.3	一次元リターンマップの定義	12
2.4	状態変数によるハイブリッドリターンマップの定義	13
2.5	むすび	13
第3章	簡素なスイッチ力学系	24
3.1	まえがき	24
3.2	系の定義	25
3.3	1次元位相マップの定義	25
3.4	パラメータによる分岐現象	25
3.5	周期軌道の探索と安定化	26
3.6	むすび	26
第4章	むすび	38

目 次

1.1	単層インバータの回路図	7
1.2	三角波比較法の原理図	8
1.3	デルタ変調方式の原理図	9
2.1	(a) 回路モデル (b) ヒステリシス特性	14
2.2	正弦波しきい値を有すスイッチ力学系	15
2.3	三角波しきい値を有すスイッチ力学系	16
2.4	典型的な波形 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$	17
2.5	典型的な波形 $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$	18
2.6	典型的なりターンマップ $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$	19
2.7	典型的なりターンマップ $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$	20
2.8	b に関する分岐ダイアグラム $c = 1.0, d = 0.5$	21
2.9	周期的なハイブリッドリターンマップ $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$	22
2.10	周期的なハイブリッドリターンマップ $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$	23
3.1	強制リセットを付加したスイッチ力学系	27
3.2	典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5, \tau_r = 0.3$	28
3.3	典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5, \tau_r = 0.5$	29
3.4	典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5, \tau_r = 0.3$	30
3.5	典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5, \tau_r = 0.49$	31
3.6	τ_r に関する分岐現象	32
3.7	接線分岐近傍のMAPの移り変わり (a) $\tau_r = 0.437$, (b) $\tau_r = 0.438$, (c) $\tau_r = 0.440$	33

3.8	2パラメータ分岐図	34
3.9	MAP における探索過程	35
3.10	波形による探索安定化の過程	36
3.11	探索安定化によって得られた所望不安定周期軌道	37

第1章 まえがき

1.1 スイッチ力学系

スイッチ力学系とは、連続時間のサブシステムがスイッチによって切りかわるシステムのことである。この系は、パラメータや初期値に依存して様々な現象を呈することが知られている。また、インバータ回路 [1] や睡眠覚醒現象 [2] などに関係があり、これらの安定性を解析することは工学的にも重要である。

インバータは、直流電力を任意の周波数の交流電力に変換する電力変換装置である。電力変換を行うためにはスイッチングにより電力制御を行う必要がある。図 1.1 に最も基本的な単相インバータの回路図を示す。図 1.1 に示したように、インバータの出力は方形波電圧となるので多くの高調波を含んでいる。そのため、フィルタを用いて高調波を取り除き所望の正弦波を得る。

インバータ出力電圧の制御と低次高調波を低減するために、様々な変調技術が用いられている。パルス幅変調 (PWM, pulse width modulation) 方式は、AC モーターの速度制御や Uninterruptible Power Supply(UPS) 等に用いられるインバータに最も普及している変調方法である。PWM 方式では、周期を一定としてスイッチングパルスの幅を変化させることで平均電圧を変化させ、必要な周波数の正弦波を発生させる。基本的な PWM の手法として、必要な正弦波の周波数である基準波と三角波を比較し、パルス幅を決定する三角波比較法が最も広く用いられている。図 1.2 に三角波比較法の原理図を示す。三角波比較法はアナログ回路によって実現されるが、ソフトウェアを用いて所望の三相の正弦波 PWM 波形を作る SPACE-VECTOR Modulation も近年用いられている [8] - [10]。

本論文では、PWM の基本的な手法のひとつであるデルタ変調 (Delta Modulation) [3]

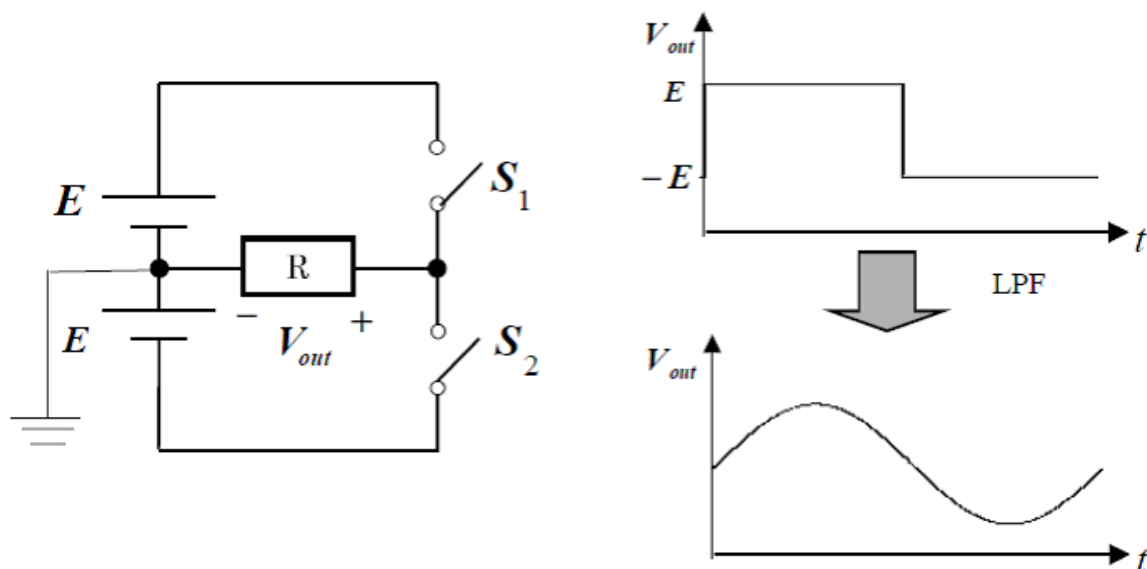


図 1.1: 単層インバータの回路図

- [7] について考察する。デルタ変調は 1981 年に P. D. Ziogas らによって提案され、その後、数多くの研究がなされてきた。デルタ変調では、しきい値が周期的に変化するヒステリシスコンパレータの出力によってパルス幅を決定する。図 1.3 にデルタ変調の原理図を示す。デルタ変調には以下のような特徴がある。

- ・ 構成が簡単である
- ・ 低次高調波を抑制することができる
- ・ 目標電圧への応答性が三角波比較法よりもよい

一方で、スイッチング周波数が一定でないためインバータ出力の周波数がゆらぐ等の問題点が指摘されている。

1.2 カオス制御

本論文ではパルス幅変調 (PWM, pulse width modulation) 方式と呼ばれるインバータ回路の制御信号を基にしたスイッチ力学系の解析を行い、カオス的な軌道に対し不動点を探索し安定化する手法を提案し、適用することによって所望周期解を得ることを目的とする。不安定周期軌道 (UPO, Unstable periodic orbit) とは、カオスアトラクタの中に埋め込まれている実際には観測することのできない不安定な周期軌道であり、

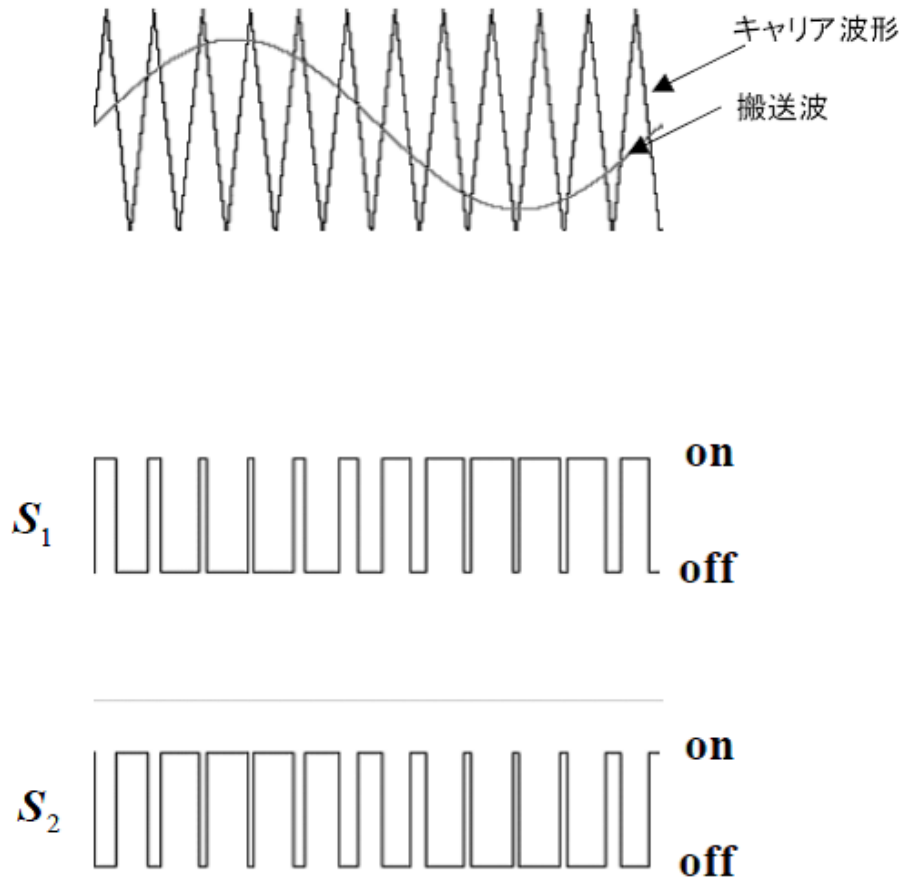


図 1.2: 三角波比較法の原理図

この所望 UPO を安定化することは、非線形回路やそれに基づいたシステムにおいて基本的な問題である。このように所望 UPO がカオスアトラクタに埋め込まれている場合、その所望 UPO を安定化する問題を カオス制御 と呼び、パワーコンバーター [11] - [14]、人工ニューロンシステム [15] [16] など様々な研究がなされている。このカオス制御は、カオスアトラクタがカオスの中に埋め込まれている所望 UPO の近傍を通らなくてはならないという定理 (Li-Yorke の定理 [17]) を利用し、所望 UPO を安定化させるために効果的な制御を適用するものである。このカオス制御は、一つのカオスアトラクタからそれに含まれる複数の UPO が安定化の対象となることが特徴であり、制御によって一つのカオスアトラクタから様々な周期の UPO を取り出すことが可能である。今日、カオス制御に関する様々な興味ある研究 [18]- [20] がなされているが、1990 年に E. Ott、C. Grebogi、J. A. Yorke によって提案された Ott-Grebogi-Yorke method

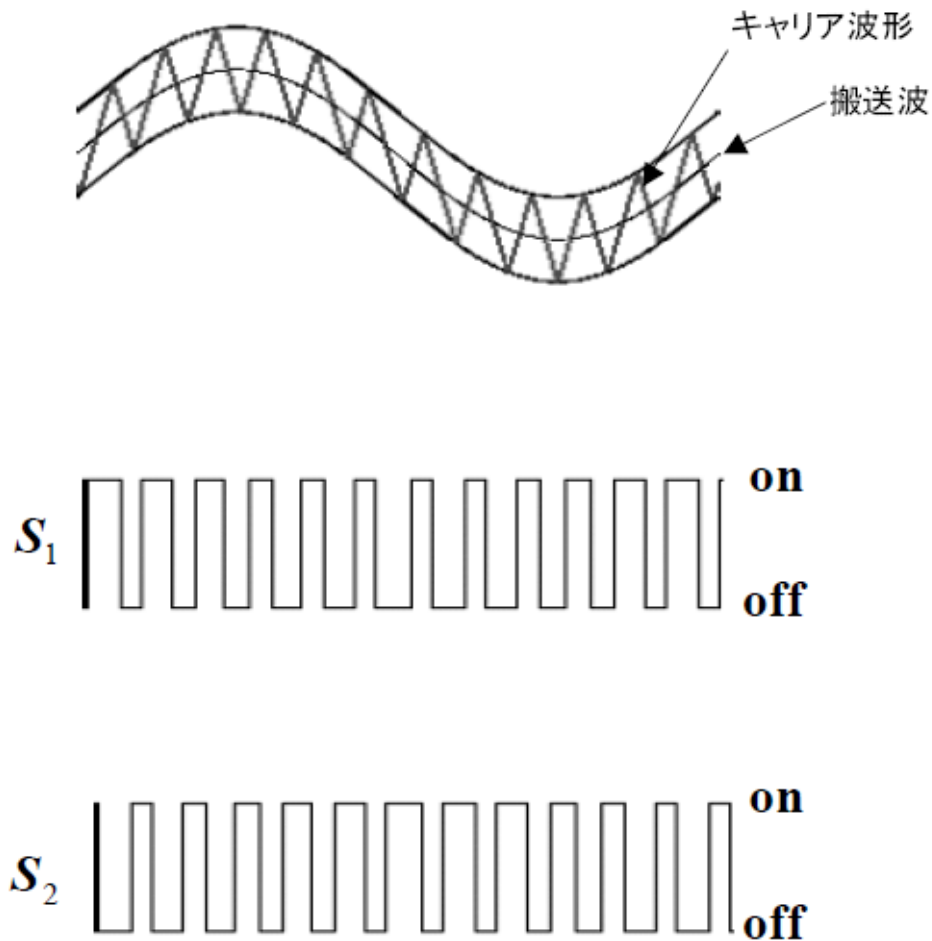


図 1.3: デルタ変調方式の原理図

(OGY 法) [21] が最初のカオス制御法である。この OGY 法は、システムのパラメータを所望 UPO の近傍において、線形近似に基づいて微小に摂動させることによって安定化を実現する制御法である。この制御法の提案によって、カオス制御の研究は盛んに行なわれるようになった。そして、以後の代表的な制御法として、E. R. Hunt によって提案された、Occasional proportional feedback (OPF) [22] や、K. Pyragas と A. Tamaševičius によって提案された、delayed feedback control (DFC) [23] [24] など、様々な制御法が提案されている。

本論文では4章から構成される。

2章では、デルタ変調方式 PWM インバータの制御信号を基にした三角はしきい値を有するスイッチ力学系の呈する現象について考察する。この様な系は多彩な非線形現象を呈することが知られている。実際には正弦波しきい値を用いることが多いが、非

線形システムとして見たとき解析的に厳密解を求めることができず、数値的に解くことしかできない。そこで、解析的に厳密解を容易に求めることができる三角波しきい値を用いることにより、より厳密な分岐解析が行える。これらの呈する非線形現象を解析することは工学的な発展を考えるうえで重要な問題である。まず、一次元位相マップによる解析を行う。次に、パラメータを可変した時の分岐現象の解析を行い、3章では、安定状態変数による一次元位相マップの定義を容易にするために、強制スイッチを付加した系を考える。強制スイッチとはある位相になったタイミングで状態変数の傾きを強制的に負に切り替える、というスイッチングルールを加える。これにより、スイッチングを行うタイミングにおける状態変数と次の位相における状態変数の関係を一意に固定できるため、周期上のタイミングにおいて状態変数マップを容易に定義できる。また、このスイッチングルールを適用することにより、より多彩な現象を呈することが確認できた。この現象を解析するため、一次元位相マップによる解析を行い、安定化手法の適用の第一歩として、不動点の個数に注目した接線分岐に関する解析を行う。次に、二分法を基にした探索 + 安定化手法を適用する。前章で解析を行った系においてカオス的軌道を呈したパラメータの UPP を探索し、UPO にジャンプすることにより安定化を行い所望安定周期軌道を得る。

第2章 簡素なスイッチ力学系

2.1 まえがき

スイッチ力学系 (Switched Dynamical System, SDS) は、連続時間のサブシステムがスイッチによって切りかわる系で、インバータ回路や睡眠覚醒モデルに関係のある系である。また、スイッチングルールやパラメータにより安定周期現象や概周期解、分岐現象などの様々な非線形現象を呈することが知られている。

本章ではデルタ変調 (DM, Delta Modulator) PWM インバータの制御信号や睡眠覚醒モデルに関係のある簡素な SDS について考える。このデルタ変調回路は独立した電圧制御用回路として利用することができる。同回路はキャパシタ、電圧制御電流源 (VCCS)、電流制御電圧源 (CCVS) で構成される。図 2.1 に簡素な回路モデルと、ヒステリシス特性を示す。通常では、デルタ変調方式 PWM インバータの制御信号は、図 2.2 に示すような正弦波周期しきい値を有する。しかし、正弦波しきい値を用いた時、厳密解を解析的に求めることが不可能である。そのため、オイラー法やルンゲ・クッタ法を用いた数値解析をされることが多い。

本論文では、図 2.3 のような三角波しきい値の系を用いることにより、解析的に厳密解を求めることが可能な系を用い、より厳密な解析を行う。解析の方法としては、一次元マップを用いた分岐現象を解析を行う。

2.2 系の定義

対象とする系は以下の図で表せられる。

$$\frac{dx}{d\tau} = \begin{cases} b & \text{for } x \leq u(\tau) + c \equiv u_+(\tau) \\ -b & \text{for } x \geq u(\tau) - c \equiv u_-(\tau) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$u(\tau) = \begin{cases} 4d(\tau - 1/4) & \text{for } 0 < \tau \leq 1/2 \\ 4d(\tau - 3/4) & \text{for } 1/2 < \tau \leq 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

ただし、 x は無次元状態変数、 τ は無次元時間である。二つの三角波しきい値 $u(\tau)$ を有し、その間を状態変数が増減する。

状態変数 x が増加中、上しきい値 $u_+(\tau)$ に接した時スイッチが切り替わり、状態変数の傾きが減少に転じる。同様に、状態変数 x が減少中、下しきい値 $u_-(\tau)$ に接した時スイッチが切り替わり、状態変数の傾きが増加に転じる。このような動作を繰り返す系を考える。図に典型的な波形を示す。このように周期的なパラメータ領域と非周期的なパラメータ領域が複雑に混在していることが確認できる。

2.3 一次元リターンマップの定義

現象の解析の為に、一次元リターンマップを導入する。一次元リターンマップは非線形システムの解析に一般的に用いられている。

図のように、状態変数 x が減少して、 n 回下しきい値に達し傾きが+に転じる時の τ を τ_n とする。さらに一周期経過し、再び下しきい値に達した時の τ を τ_{n+1} とする。 τ_{n+1} は τ_n によって一意に定まる。よって、

$$\tau_{n+1} = F(\tau_n) \quad (2.3)$$

を定義できる。

周期が1であることを考慮に入れ、リターンマップを以下のように定義する。

$$\theta_{n+1} = f(\theta_n) \equiv F(\tau_n) \bmod 1 \quad (2.4)$$

ここで、リターンマップのアトラクタに関する定義を行う。 $f^p(\theta_m) = \theta_m$ となるとき、 θ_m を周期 p の周期点と呼ぶ。ここで、 f^p は f の p 回写像である。特に、 $p = 1$ の時の周期点を不動点と呼ぶ。

$f'(\theta) < 1$ であるときの不動点は吸引的不動点と呼ばれ、不動点の近傍における安定性が保証される。

典型的なリターンマップを図 2.6、図 2.7 に示す。2.6 のとき、

2.4 状態変数によるハイブリッドリターンマップの定義

次に同一位相上での状態変数に注目した現象の解析を行うために、状態変数によるハイブリッドリターンマップの定義を行う。

$\tau = nT$ となる時の状態変数 x を x_n とする。一周期経過し $\tau = nT + 1$ となる時の状態変数 x を x_{n+1} とする。このとき、 x_n 、 x_{n+1} 共に、傾きが正、傾きが負という 2 つの状態を取りうる。 x_n と x_{n+1} の傾きによって場合分けした 4 面のリターンマップによって一意に定義することができる。

典型的なハイブリッドリターンマップを図 2.9、図 2.10 に示す。

2.5 むすび

本章では基礎として最もシンプルなスイッチ力学系の解析を行った。課題として詳細な解析等があげられる。

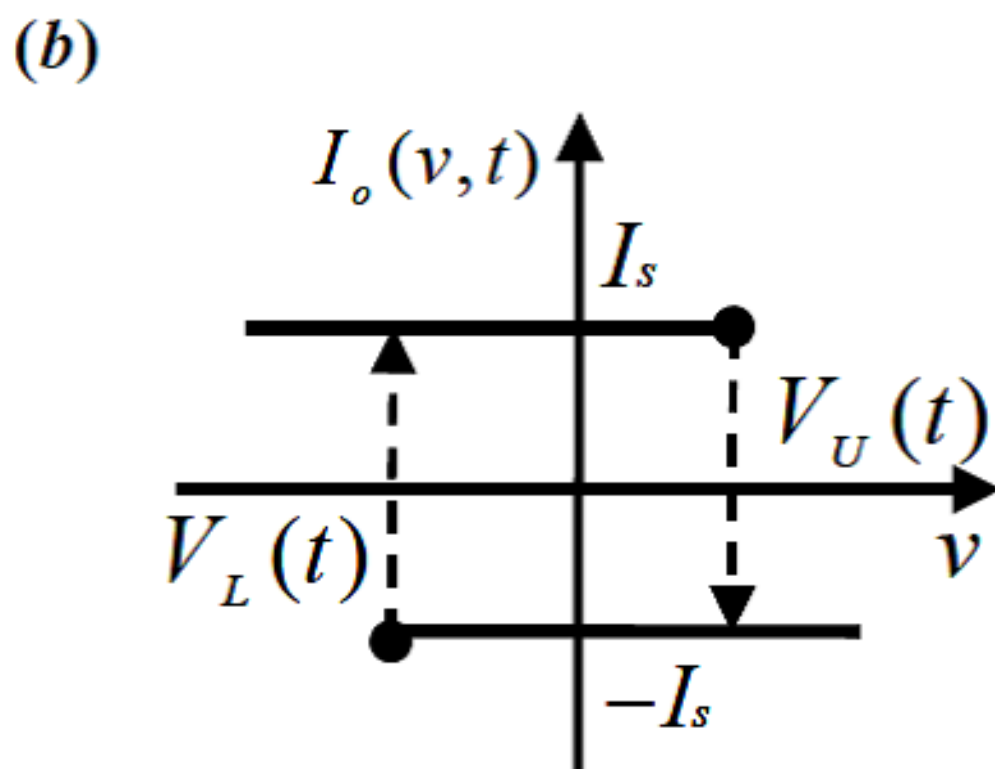
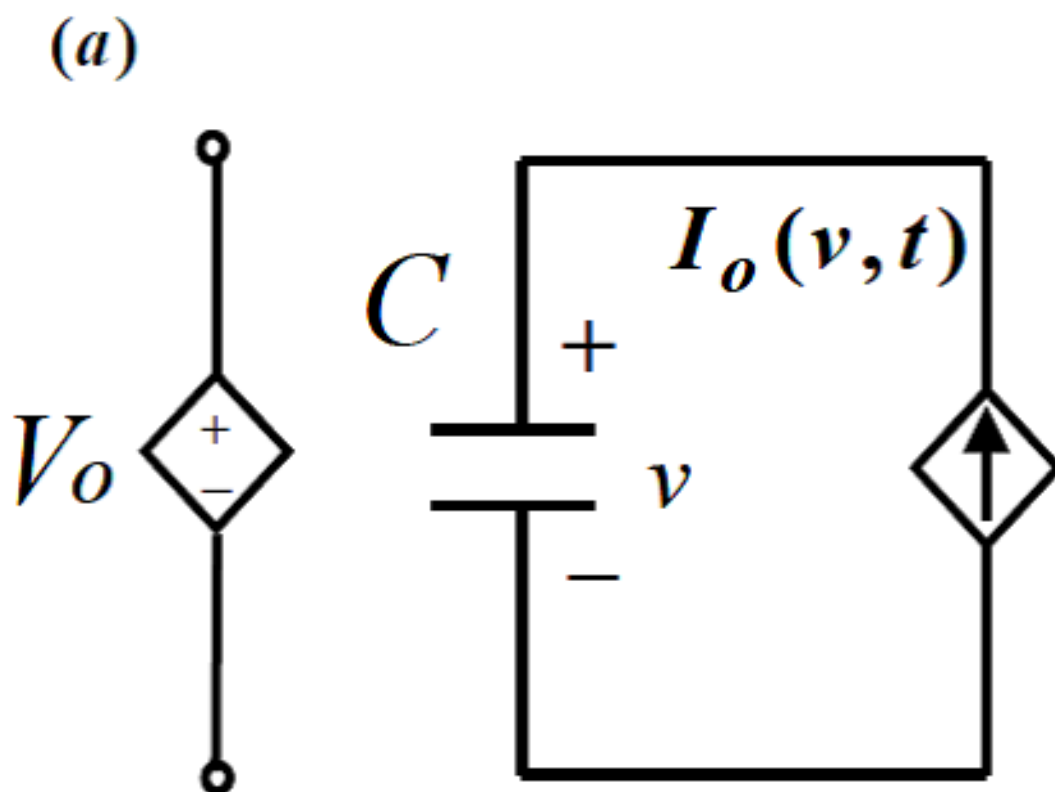


図 2.1: (a) 回路モデル (b) ヒステリシス特性

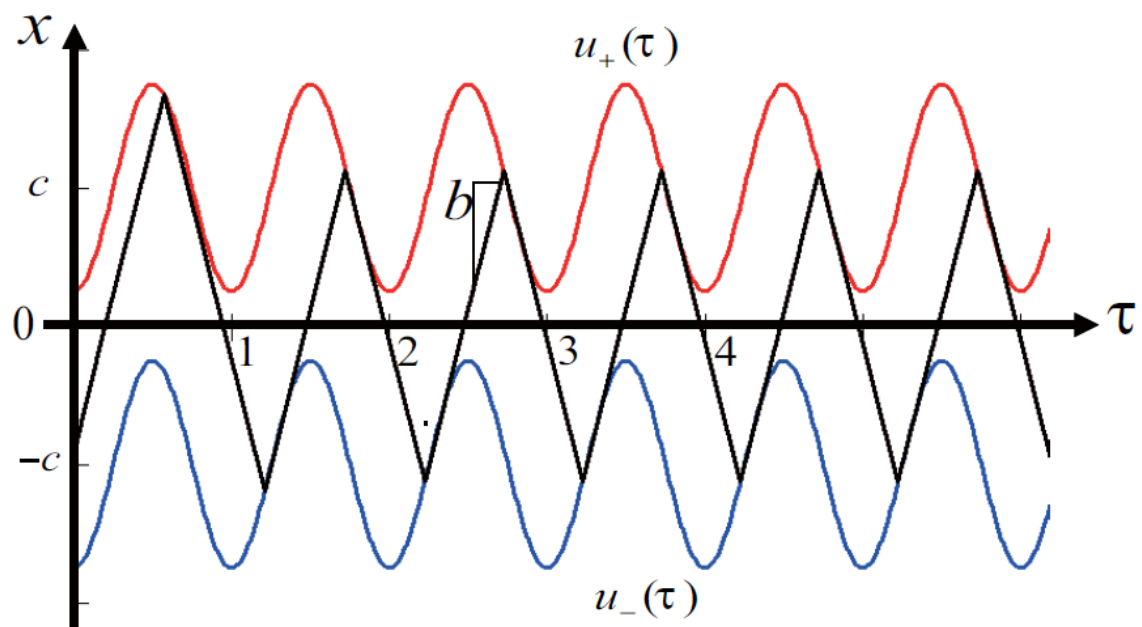


図 2.2: 正弦波しきい値を有すスイッチ力学系

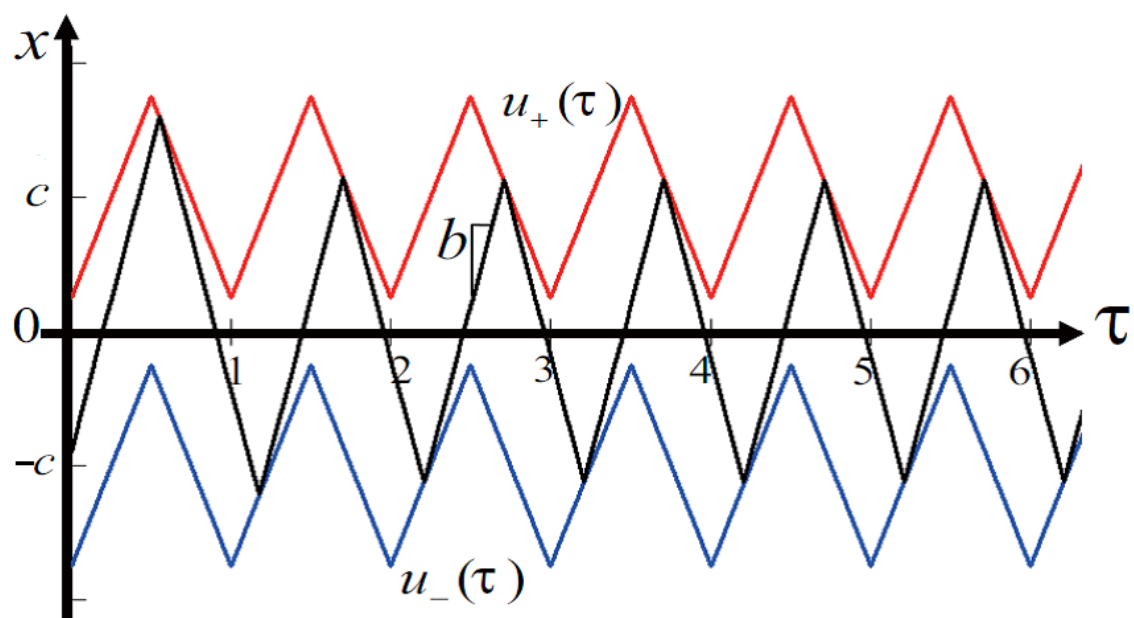


図 2.3: 三角波しきい値を有すスイッチ力学系

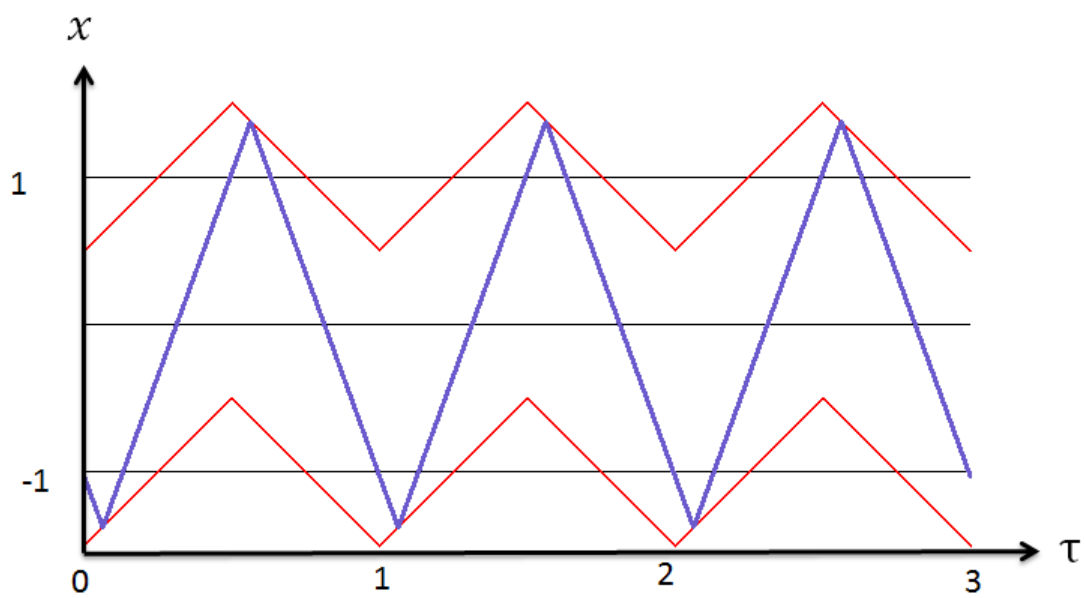


図 2.4: 典型的な波形 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$

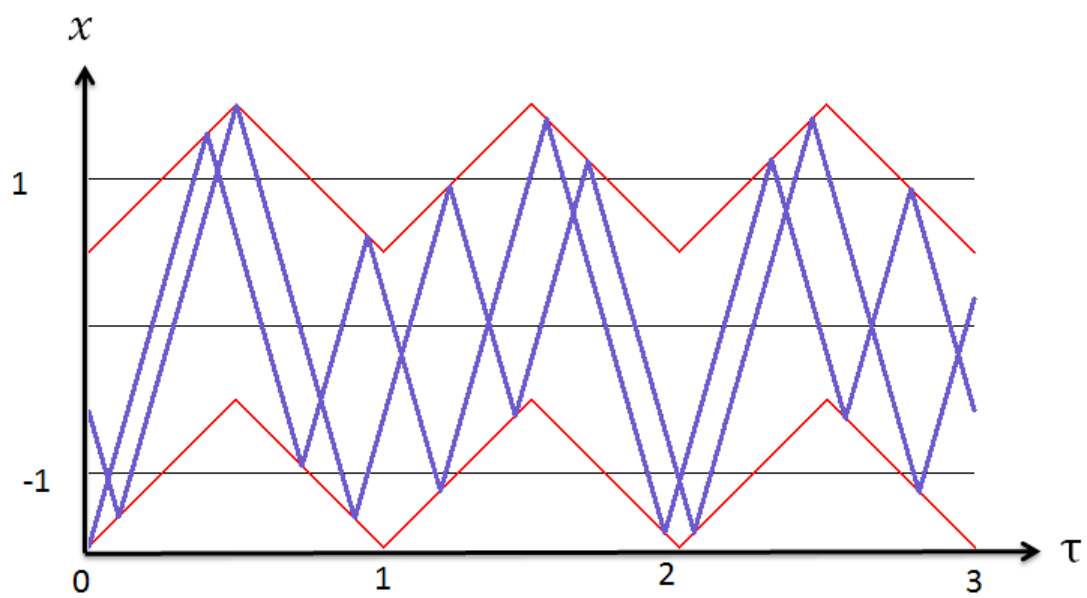


図 2.5: 典型的な波形 $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$

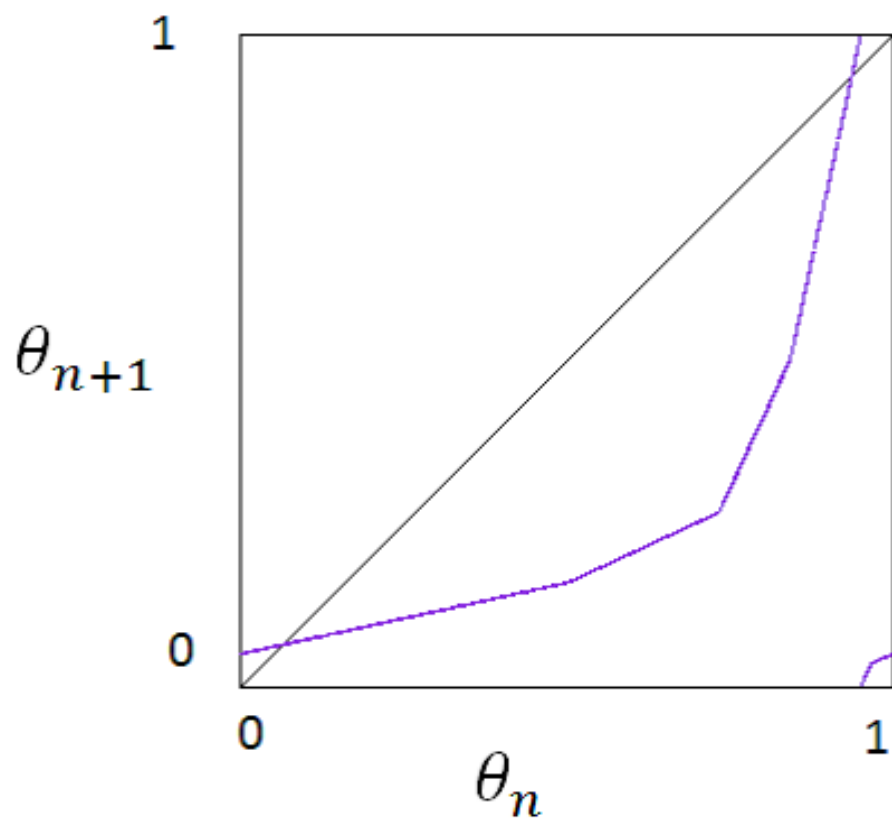


図 2.6: 典型的なリターンマップ $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$

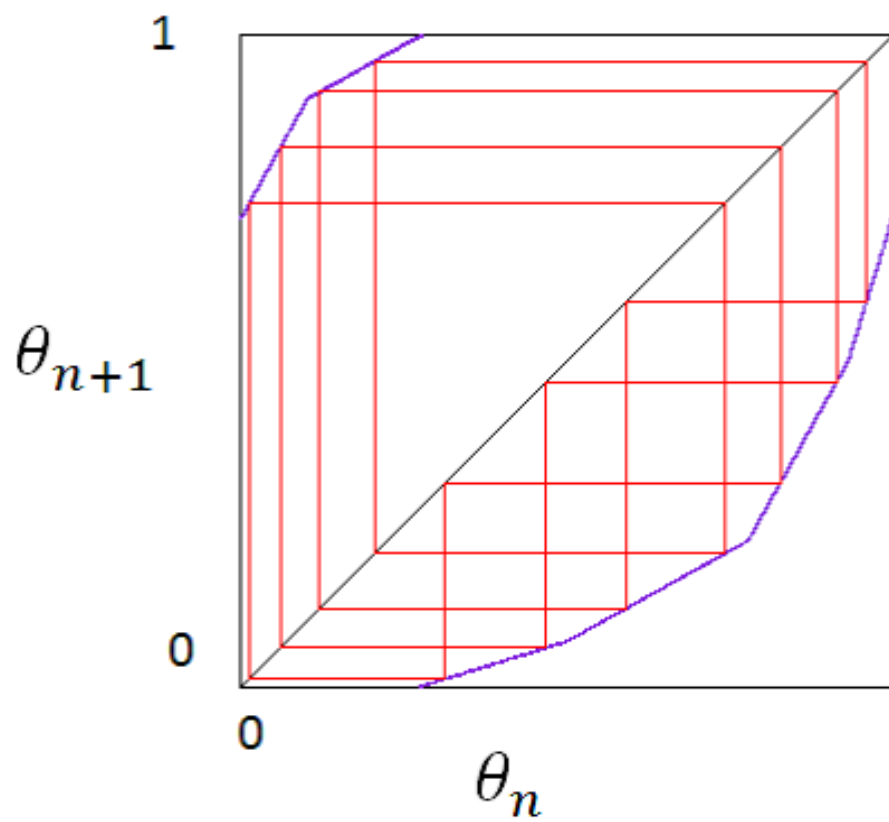


図 2.7: 典型的なリターンマップ $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$

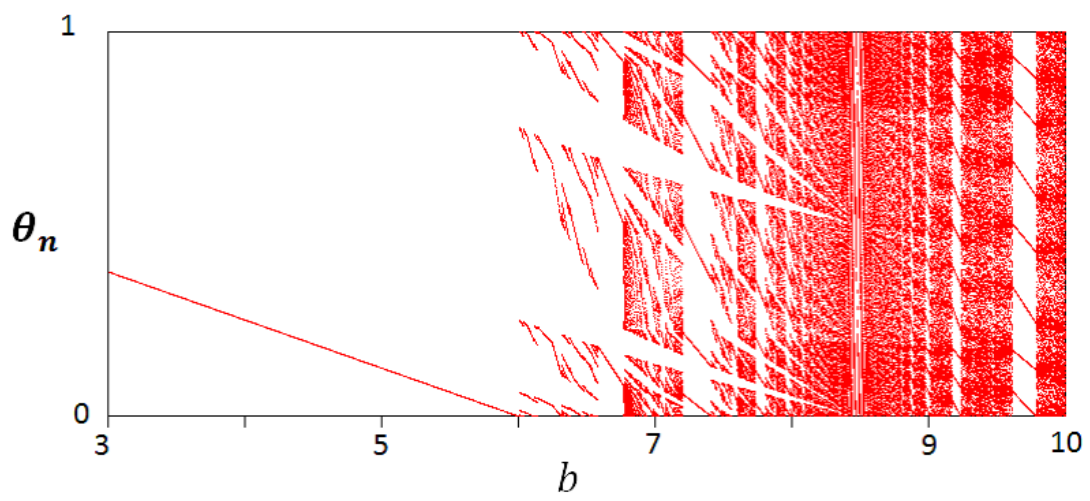


図 2.8: b に関する分岐ダイアグラム $c = 1.0, d = 0.5$

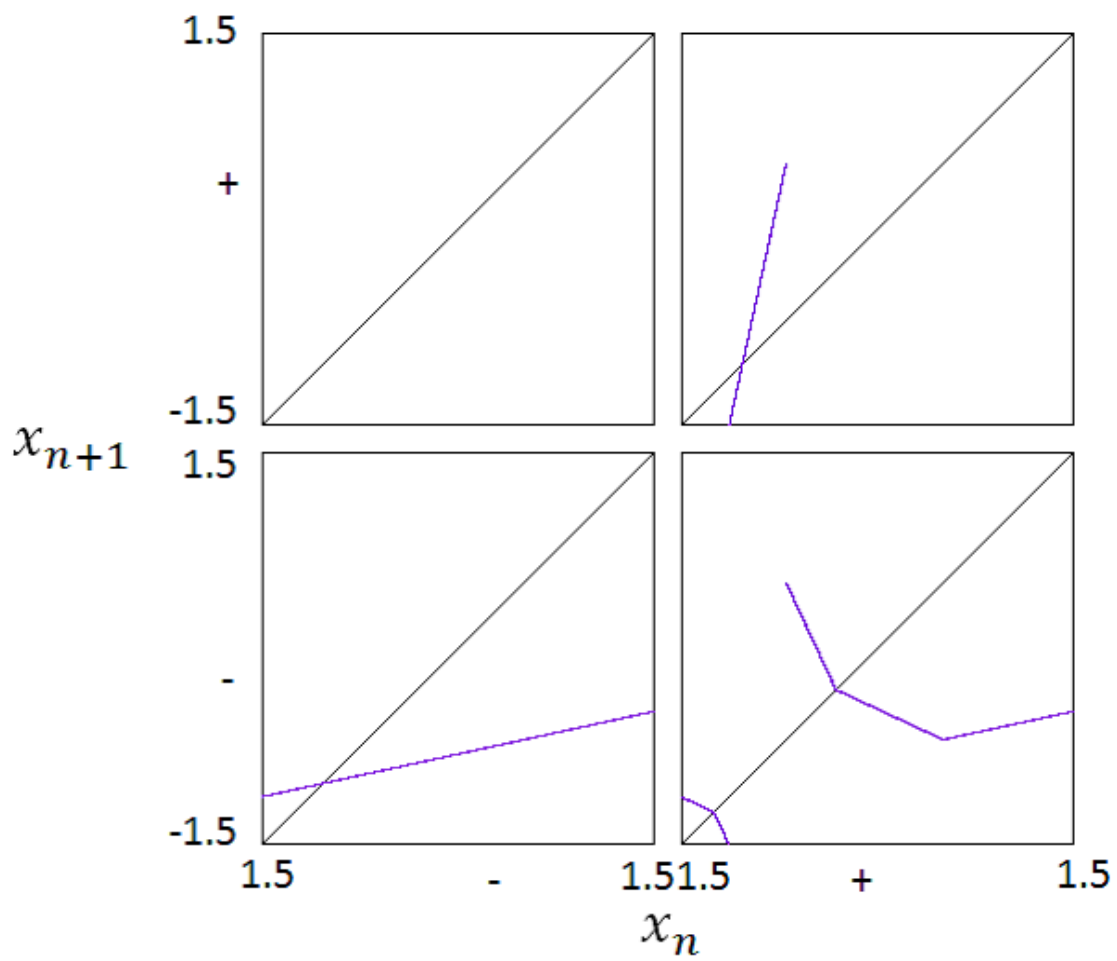


図 2.9: 周期的なハイブリッドリターンマップ $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5$

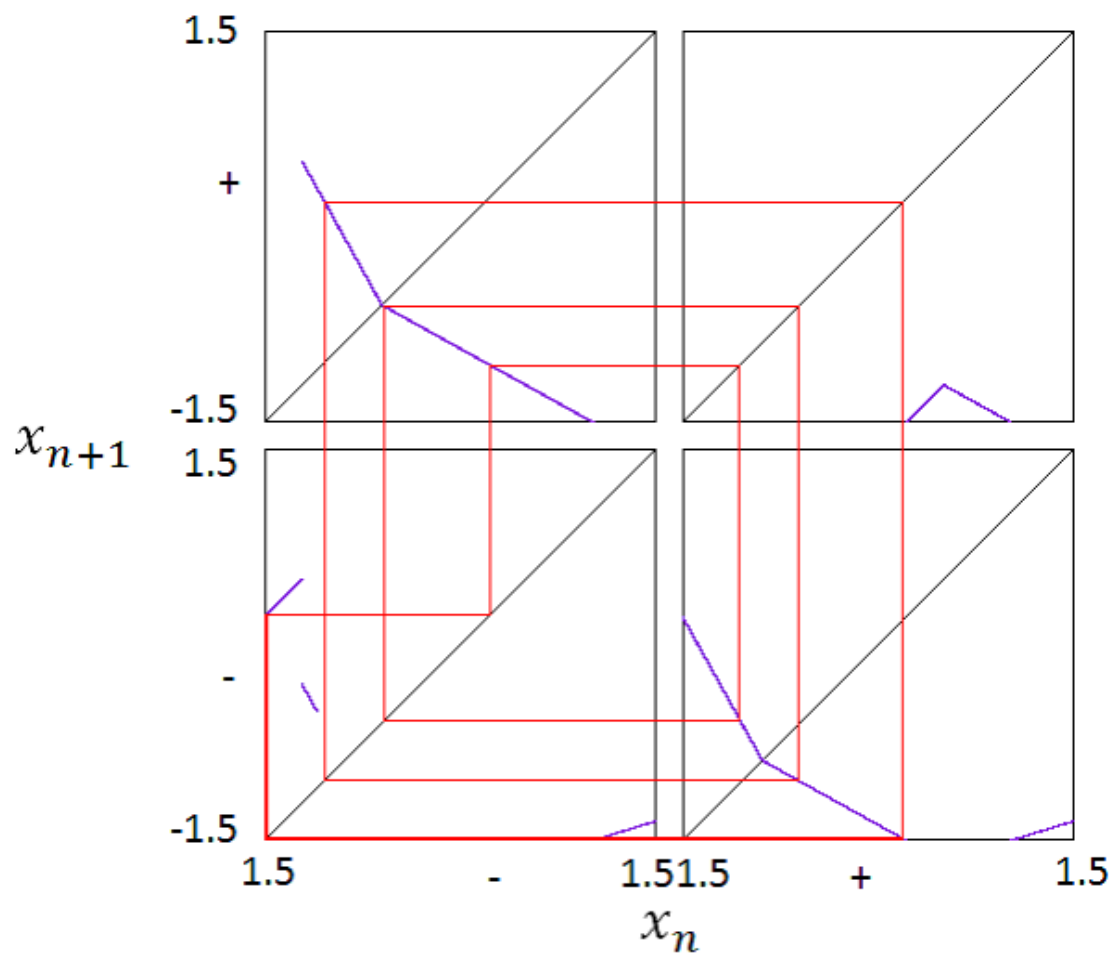


図 2.10: 周期的なハイブリッドリターンマップ $b = 7.0, c = 1.0, d = 0.5$

第3章 簡素なスイッチ力学系

3.1 まえがき

連続時間ダイナミクスが離散的なスイッチルールによって切り替わるシステムは、スイッチ力学系 (SDS) とよばれ、盛んに研究されている。[1] スイッチングインバータ [?] や睡眠覚醒モデル [2] など様々な系と関連する SDS が研究されている。このようなシステムは、パラメータや初期値に依存して、様々な非線形現象 (カオス/周期現象など) を呈する。この系を解析することは、分岐現象の基礎としてだけではなく、工学的応用の面からも重要である。

本論文では、簡素な SDS の基本的なダイナミクスの解析を行い、簡素な制御による安定化手法を提案する。今回使用する系は、三角は周期しきい値を持ち、状態変数がしきい値間で増減を繰り返す系を考える。さらに、ある位相において強制的に傾きを切り替える。というスイッチングを行う。使用する系は、周期しきい値に三角波を用いることで、区分線形のリターンマップを導出できる。始めに、現象解析のためにリターンマップを用いた現象解析を行う。リターンマップを用いることにより、周期スイッチを加えることで、より多彩な分岐現象が生じることを確認できた。また、接線分岐が生じることにより、安定とカオスが共存する領域を持つことが確認された。本論文では、接線分岐と不動点の個数に関する分岐に関してより詳細な解析を行った。

次に、不動点を探索し、同時に安定化を行う手法の提案を行う。提案する安定化手法 (ESM) は、ある位相における状態変数を、インパルス制御により所望の数値にジャンプすることによって、不動点を探索しかつ安定化する。

3.2 系の定義

目的とする系は以下の無次元化関数によって表現される;

$$\frac{dx}{d\tau} = \begin{cases} b & \text{for } x \leq u(\tau) + c \equiv u_+(\tau) \\ -b & \text{for } x \geq u(\tau) - c \equiv u_-(\tau) \\ & \tau = nT + \tau_s \end{cases} \quad (3.1)$$

$$u(\tau) = \begin{cases} 4d(\tau - 1/4) & \text{for } 0 < \tau \leq 1/2 \\ 4d(\tau - 3/4) & \text{for } 1/2 < \tau \leq 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

ただし、 τ は無次元時間、 x は無次元状態変数である。 u_τ は、周期が1である三角波しきい値である。ただし、右辺は図。に示したように、 $x = u_+(\tau)$ となると、 b から $-b$ に切り替わり、 $x = u_-(\tau)$ となると、 $-b$ から b に切り替わる。さらに、この SDS に周期スイッチを加える。周期スイッチは以下のルールで行われる。

$\tau = n + \tau_r$ の時、 x の傾きを強制的に $-b$ とする。

このルールを加えることにより、 τ_r 上での状態変数の傾きが一意になり、状態変数によるリターンマップの定義が容易になる。また、周期スイッチを加えることにより、より多彩な現象を確認できる。

3.3 1次元位相マップの定義

様々な現象の解析の為に、解析を行うためにリターンマップを定義する。図1に示すように、 $\tau = n + \tau_r$ における状態変数を x_n とする。 $x_{(n+1)}$ は x_n によって一意に決まる為、状態変数マップを定義できる。

$$x_{n+1} = F(x_n) \quad (3.3)$$

3.4 パラメータによる分岐現象

図3.4 (a) は1つの安定不動点を持ち、安定周期軌道を呈する。図3.5 は、1つの安定不動点と2つの不安定不動点を持ち、初期値により共存する。

次に、不動点の個数に注目して解析を行う。図 3.7 のように $b = 5.5, \gamma = 1.0, d = 0.5$ のとき、 $\tau_r \simeq 0.438$ 近傍で不動点が接することがわかる。このような分岐現象を接線分岐 (tangent bifurcation) と呼ぶ。接線分岐が起きる境界を図 3.8 に表す。

3.5 周期軌道の探索と安定化

次に、不動点を持つパラメータ領域において、所望周期解を探索するために、二分法を基にした不動点探索を行う。不動点 x_s は、 $F(x_s) = x_s$ の点である。ここで、中点を x_M 、中点にリセットされ一周期経過した時の状態変数を x'_M とする。この不動点探索法の特徴として、探索点 p, q が不動点をただ一つはさむように配置されている場合、 x_M と x'_M の比較のみで自動的に探索し安定化できる点にある。 x'_M は、前の周期において x_M にリセットされることにより自動的に求まる為、比較回路さえあれば比較的容易に実装できると考えられる。不動点探索法は以下のルールで行う。

1. 探索点 p, q を不動点を挟むように配置する。
2. 探索点の中点 x_m を計算する。
3. $x \rightarrow x_M$ にリセットする。
4. 一周期観測し、新しい中点 x_M を計算する。
5. $x'_M > x_M$ ならば $x'_M \rightarrow q$ 、 $x'_M < x_M$ ならば $x'_M \rightarrow p$ に更新する。
6. 4. に戻る

この方法を適用することで所望周期解を得る。図??、3.10 にそれぞれマップと波形による探索過程を表す。図 3.11 に探索によって得られた所望周期解を表す。このように、不安定不動点を探索し、所望周期解を得ることができた。

3.6 むすび

簡素なスイッチ力学系の写像法を用いて解析を行った。簡素な不動点探索安定化法を適用し、所望周期解を得た。

今後の課題として、詳細な解析と回路実験、実用的な回路への適用等である。

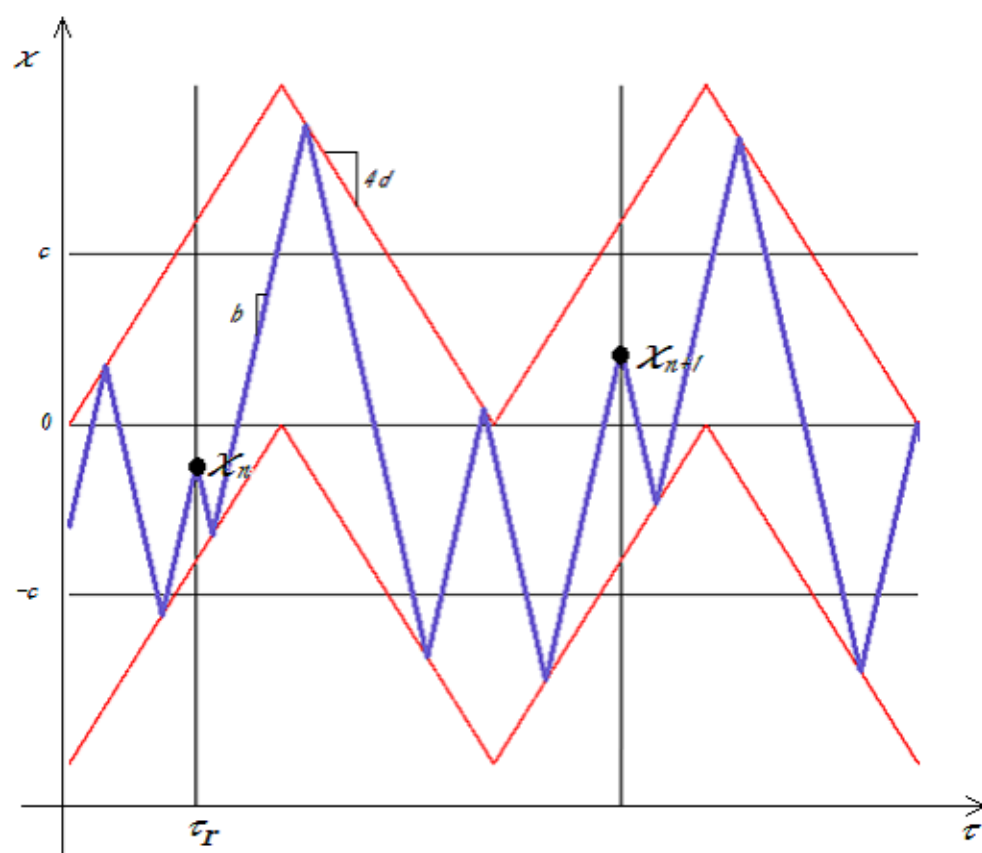


図 3.1: 強制リセットを付加したスイッチ力学系

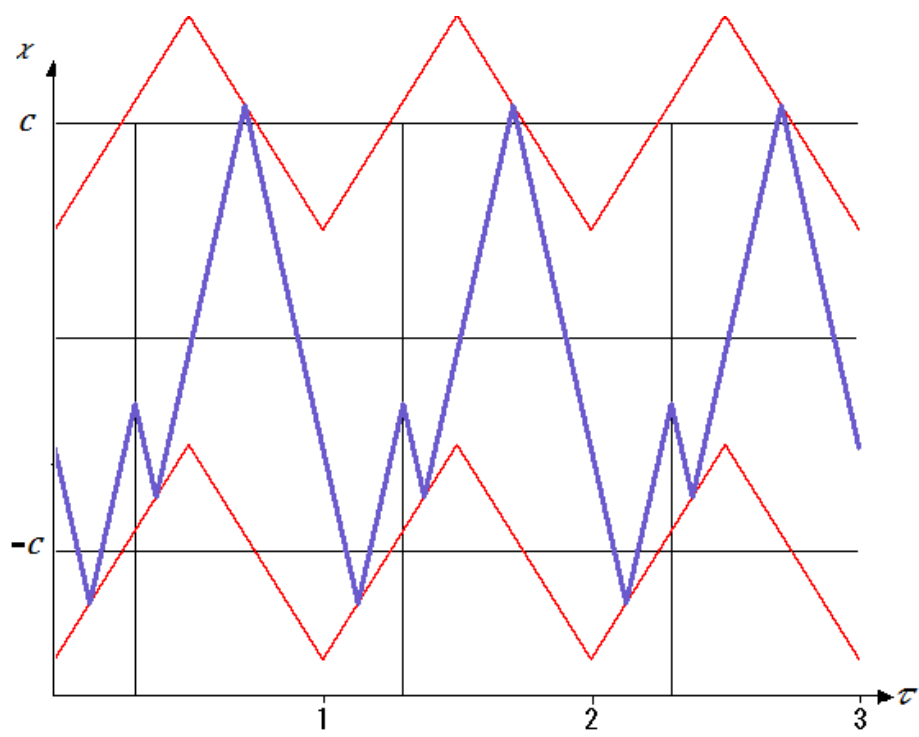


図 3.2: 典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5\tau_r = 0.3$

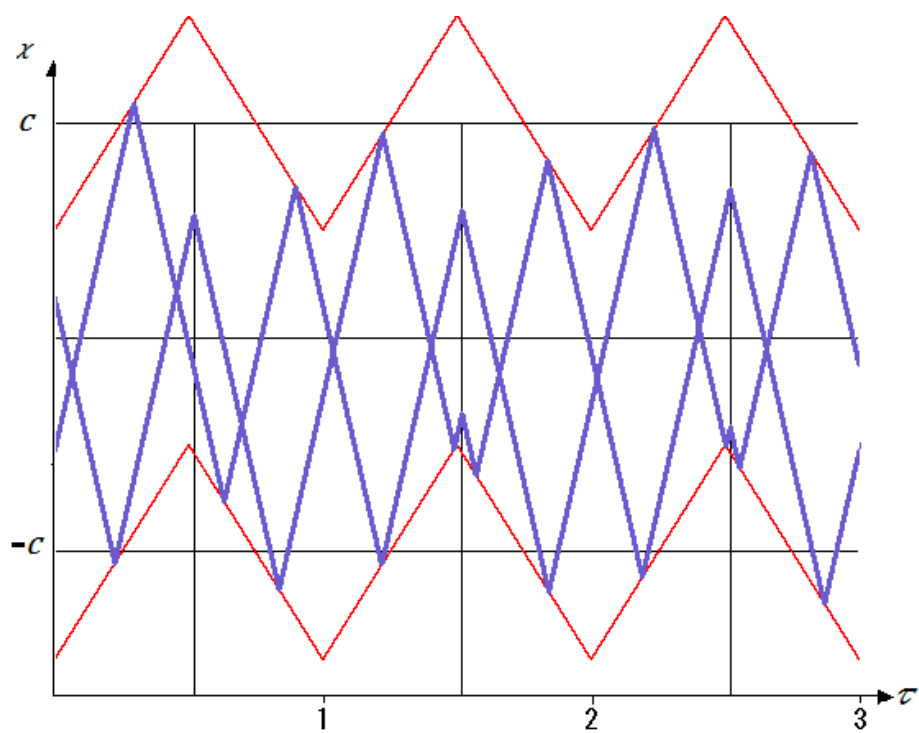


図 3.3: 典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5\tau_r = 0.5$

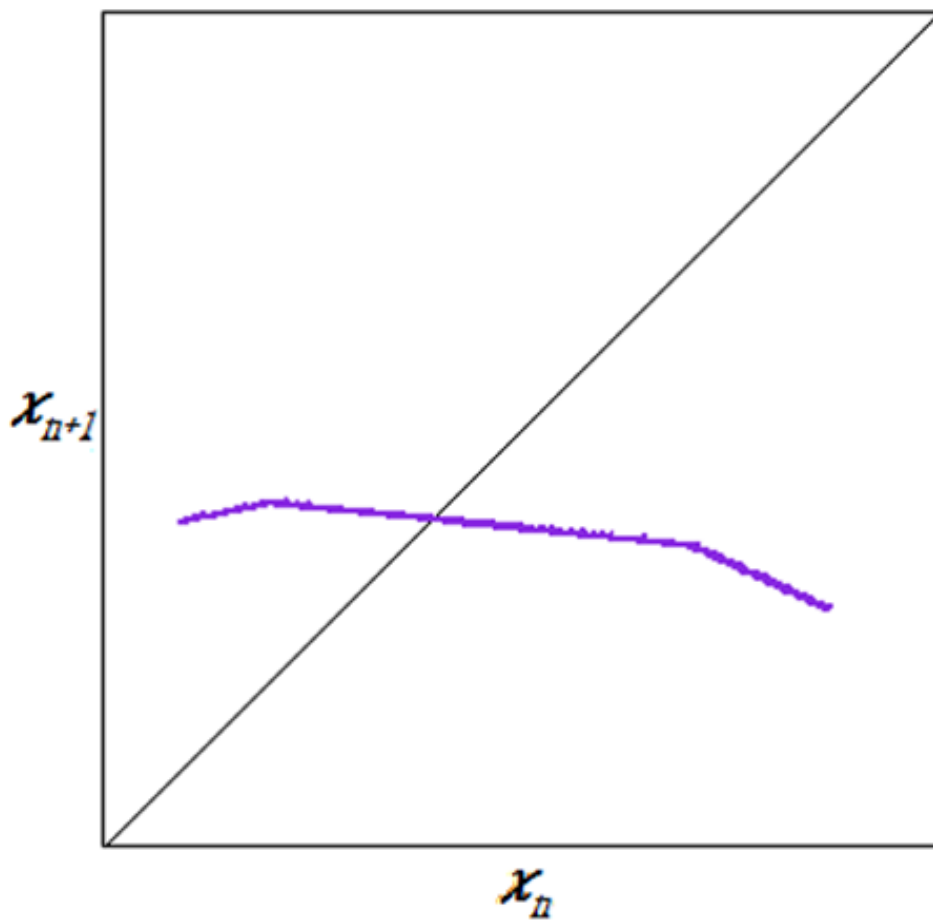


図 3.4: 典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5\tau_r = 0.3$

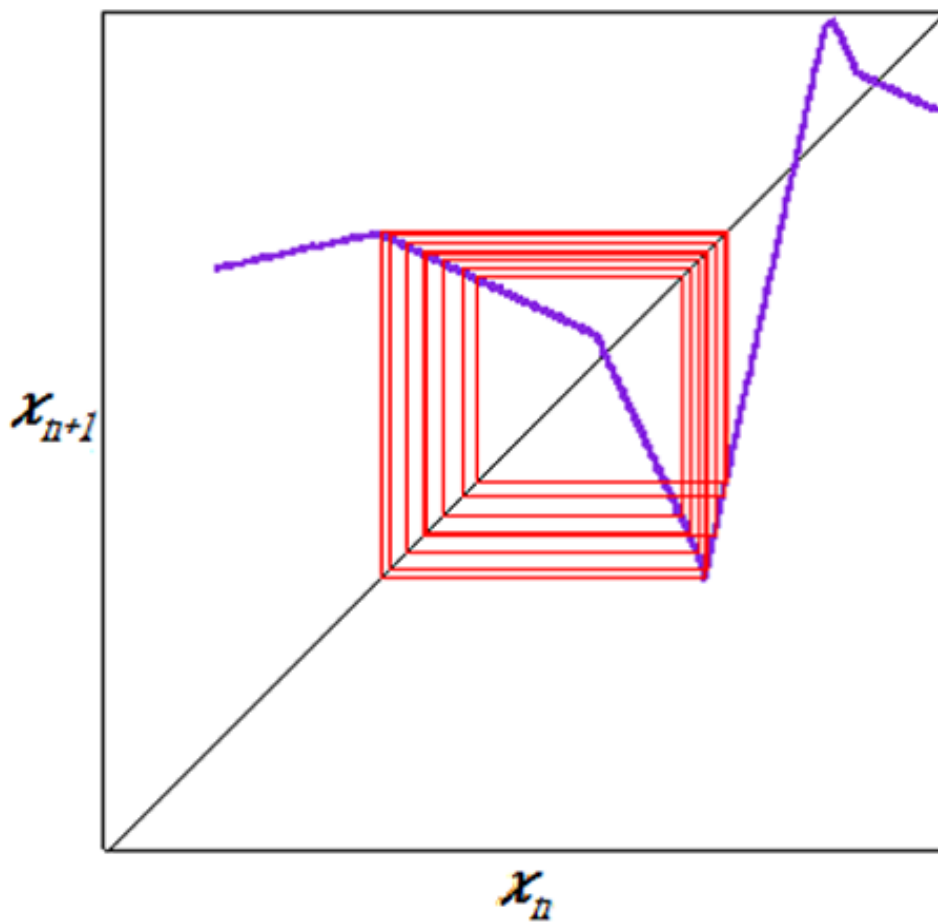


図 3.5: 典型的な波形例 $b = 5.5, c = 1.0, d = 0.5\tau_r = 0.49$

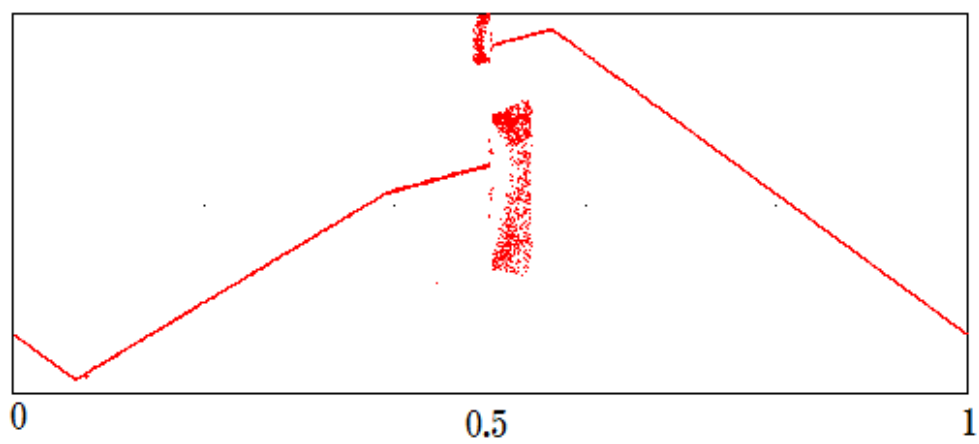


図 3.6: τ_r に関する分岐現象

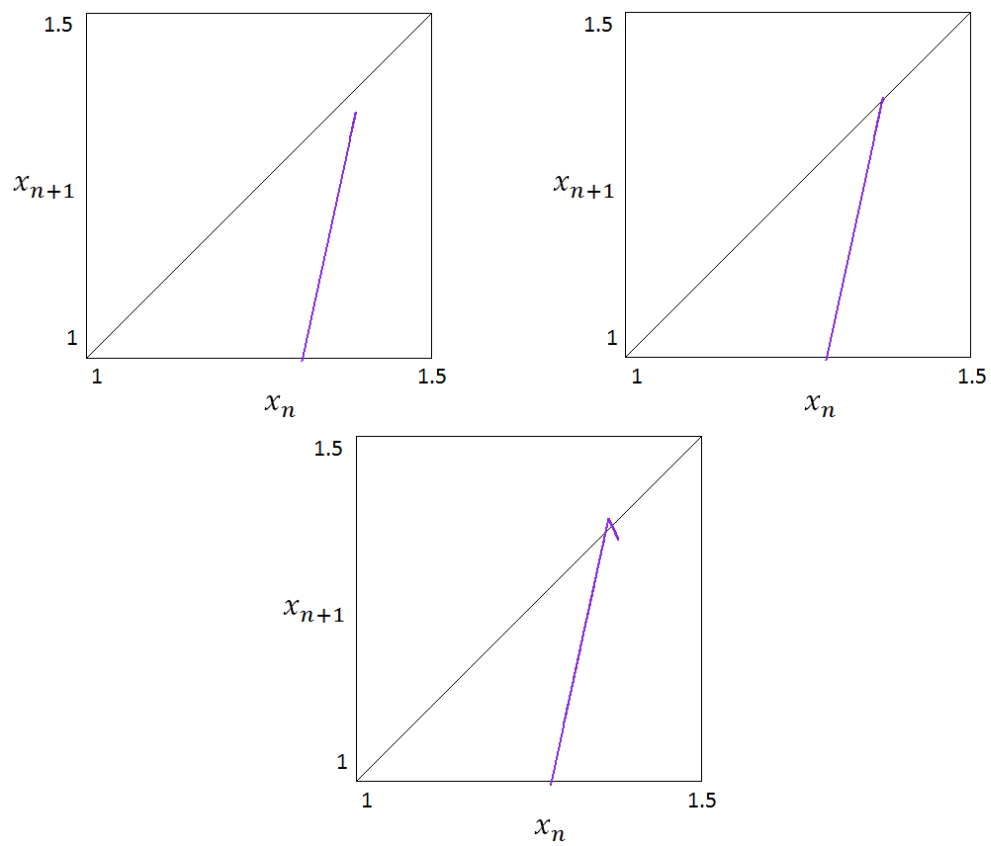


図 3.7: 接線分岐近傍の MAP の移り変わり (a) $\tau_r = 0.437$, (b) $\tau_r = 0.438$, (c) $\tau_r = 0.440$

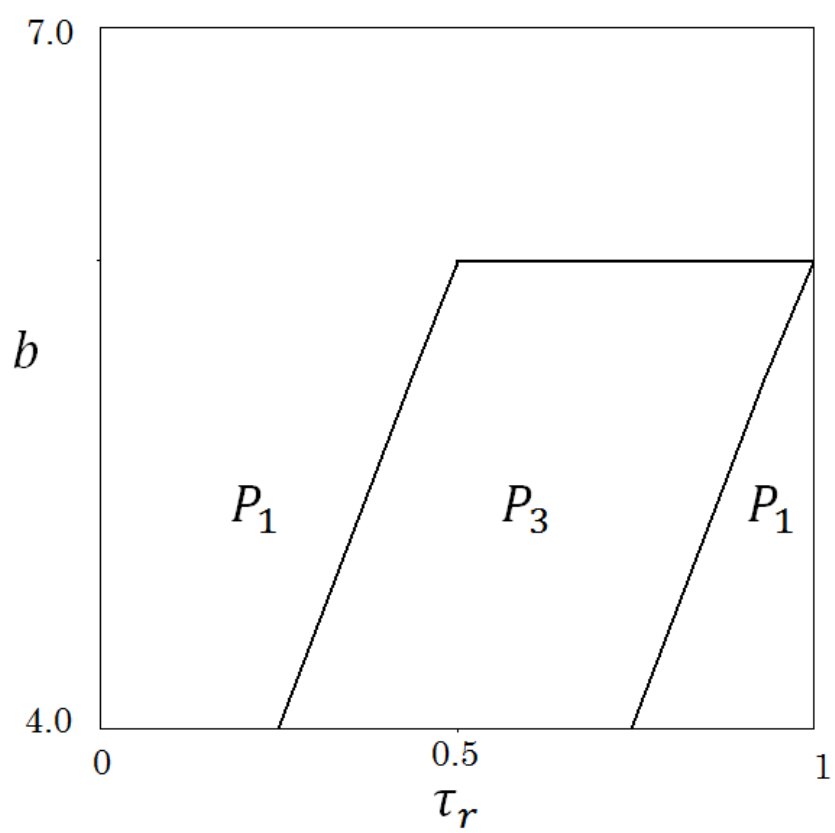


図 3.8: 2 パラメータ分岐図

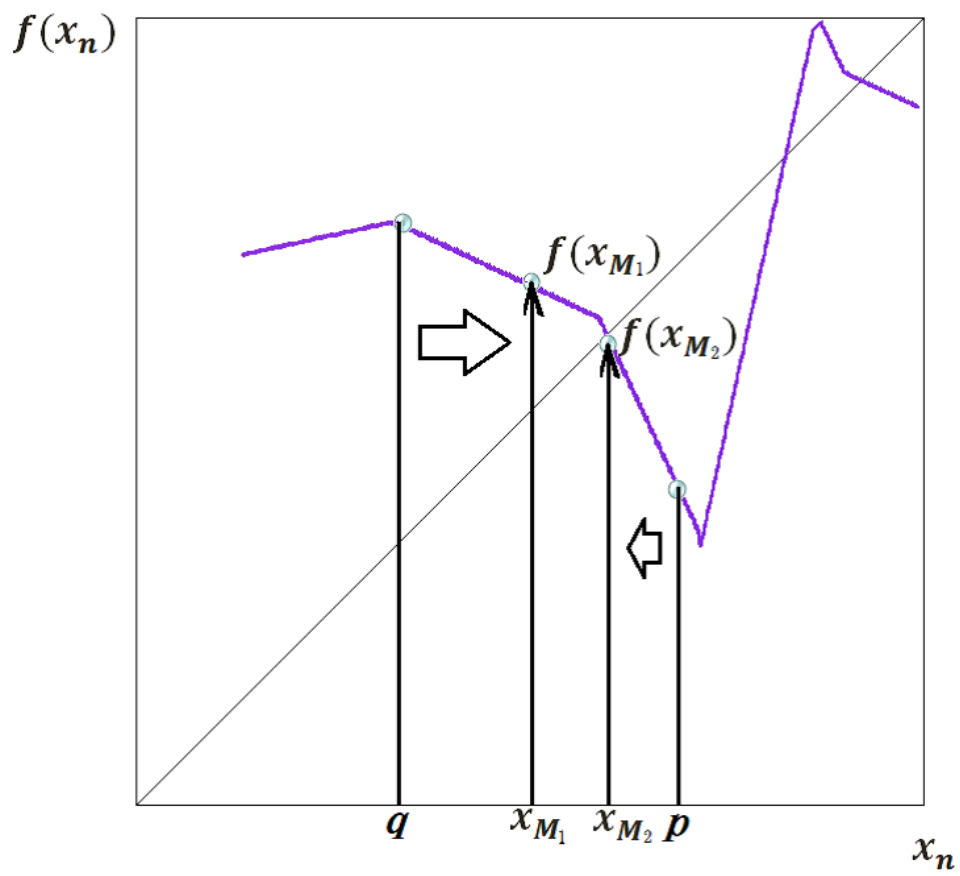


図 3.9: MAP における探索過程

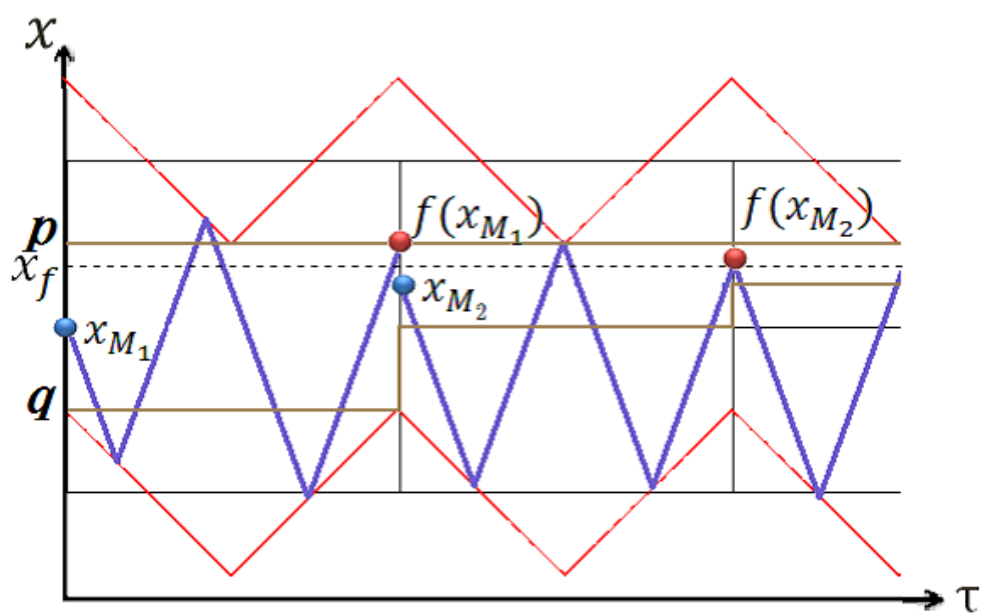


図 3.10: 波形による探索安定化の過程

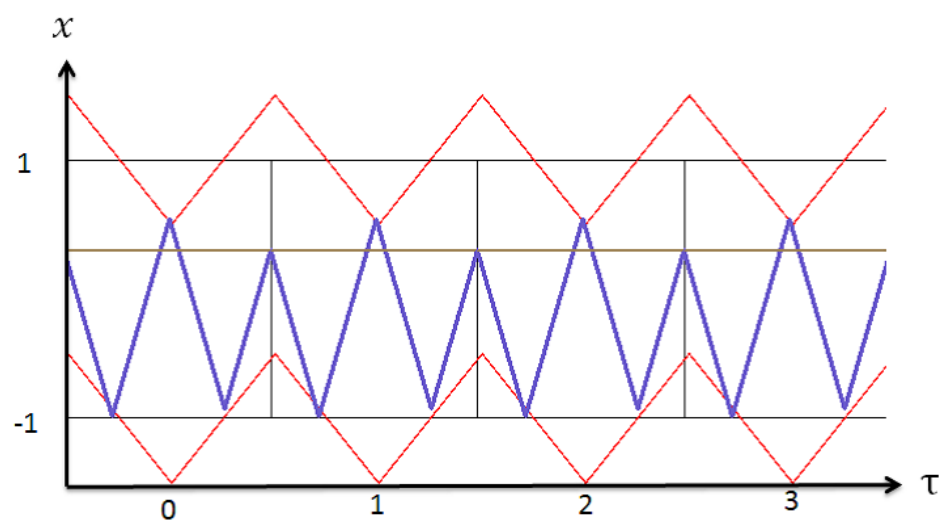


図 3.11: 探索安定化によって得られた所望不安定周期軌道

第4章 むすび

本論文では簡素なスイッチ力学系の動作の解析を行い、簡素な安定化手法を適用した。一次元リターンマップを用いた解析により、パラメータに依存して安定周期解や非周期的現象が複雑に混在することを確認した。次に、系に新たに強制スイッチングを加えたスイッチングルールの考察を行い、カオスの軌道などより複雑な現象の解析を行った。さらに不動点の個数に注目した解析を行い、接線分岐が生じる境界を明らかにした。最後に、二分法を基にした探索と安定化を同時に行う安定化手法を適用し、所望周期解を得ることができた。本論文に示した結果は非線形システムの安定化、解析の両面で重要であると考えられる。

今後の課題として以下のものが考えられる。

- ・系のさらなる詳細な解析
- ・回路実験
- ・実用的な回路による実装

などが挙げられる。

参考文献

- [1] T. Saito, H. Torikai and W. Schwarz, Switched Dynamical Systems with Double Periodic Inputs : An Analysis Tool and Its Application to the Buck-Boost Converter, IEEE Tran. Circuits Syst. I, 47, 7, pp.1038-1046, 2000
- [2] S.Daan, D.G.M.Beersma, and A.A.Borbey, Timing of human sleep: Recovery process gated by a circadian pacemaker, Amer. Physiol. Soc, pp.R11-R183, 1984.
- [3] P. D. Ziogas, Delta modulation technique in static PWM inverter, IEEE Trans. Ind. Applicat. pp. 199-204, 1981
- [4] M. A. Rahman, J. E. Quaicoe and M. A. Choudhury, Performance analysis of delta modulated PWM inverter, IEEE Trans. Power Electron. pp. 227-233, 1987.
- [5] R. Razali, V. Suddiah, M. A. Choudhury and R. Yusof, Performance analysis of online dual slope delta modulated PWM inverter, Proc. IEEE/ISCAS, pp. 845-848, 2002.
- [6] K. M. Rahman, M. R. Khan and M. A. Choudhury, Implementation of programmed modulated carrier HCC based on analytical solution for uniform switching of voltage source inverters, IEEE Trans. Power Electron. 18, pp. 188-197, 2003.
- [7] S. Sae-Sue, V. Kinnares, Ch. Tangsiriworakul and S. Potivejkul, Comparative Performance Evaluation of Fixed and Adoptive
- [8] M. A. Boost and P. D. Ziogas, State-of-the-art carrier PWM techniques: a critical evaluation, IEEE Trans. Ind. Applicat. pp. 271-280, 1988.

- [9] F. Wang, Sine-triangle versus space-vector modulation for three-level PWM voltage-source inverters, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 38, pp. 199-204, 2002.
- [10] S. K. Mondal, B. K. Bose, V. Oleschuk and J. O. P. Pinto, Space vector pulse width modulation of three-level inverter extending operation into over-modulation region, *IEEE Trans. Power Electron.*, 18, pp. 604-611, 2003.
- [11] Hysteresis Band Delta Modulation Techniques for UPS, *Proc. IEEE/International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 1999.
- [12] H. H. C. Iu and B. Robert, " Control of chaos in a PWM current-mode H-bridge inverter using time-delayed feedback ", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory appl.*, vol. 58, no. 8, pp. 1125-1129, Aug. 2003.
- [13] G. Poddar, K. Chakrabarty and S. Banerjee, " Control of chaos in DC-DC converters ", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 672-676, Jun. 1998.
- [14] Y. Zhou, H. H. C. Iu, C. K. Tse and J. -N. Chen, " Controlling chaos in DC/DC converters using optimal resonant parametric perturbation ", in *Proc. IEEE/ISCAS*, 2005, pp. 2481-2484.
- [15] T. Saito, K. Jin 'no and K. Kohari, " Controlling chaos and artificial neuron ", in *Proc. IEEE/ICNN*, 1994, vol. 3, pp. 1935-1938.
- [16] T. Saito, K. Jin 'no and H. Torikai, " Chaotic artificial neural system and its control ", *Int. J. Electoron.*, vol. 79, no. 6, pp. 797-806, Nov. 1995.
- [17] T. Y. Li and J. A. Yorke, " Period three implies chaos ", *Am. Math. Mon.*, vol. 82, pp. 985-992, 1975.

- [18] H. J. Li and J. L. Chern, " Goal-oriented scheme for taming chaos with a weak periodic perturbation: experiment in a diode resonator ", Phys. Rev. E, vol. 54, no. 2, pp. 2118-2121, Aug. 1996.
- [19] G. Gu and A. Sparks, " Bifurcation stabilization with application in jet engine control ", in Controlling chaos and bifurcations in engineering systems, pp. 347-367 (chapter 16), CRC Press, FL, USA, Ed. G. Chen, 1999.
- [20] H. Lentz and R. Berstecher, " Sliding-mode control of a chaotic pendulum: stabilization and targeting of an unstable periodic orbit ", in Proc. COC, 1997, pp. 586-589.
- [21] E. Ott, C. Grebogi and J. A. Yorke, " Controlling chaos ", Phys. Rev. Lett., vol. 64, no. 11, pp. 1196-1199, Mar. 1990.
- [22] E. R. Hunt, " Stabilizing high-period orbits in a chaotic systems: the diode resonator ", Phys. Rev. Lett., vol. 67, no. 15, pp. 1953-1955, Oct. 1991.
- [23] K. Pyragas, " Continuous control of chaos by self-controlling feedback ", Phys. Lett. A, vol. 170, pp. 421-428, Nov. 1992.
- [24] K. Pyragas and A. Tamaševičius, " Experimental control of chaos by delayed selfcontrolling feedback ", Phys. Lett. A, vol. 180, pp. 99-102, Aug. 1993.

研究業績

(国際会議)

M. Inami, T. Saito, "Exploring and Stabilizing a Desired Periodic Orbit in Simple Switched Dynamical Systems" Proc. of International symposium on Nonlinear Theory and its Applications, (NOLTA'13, Santa Fe, United State), pp.

M. Inami, T. Saito, "Basic Property of Particle Swarm Optimization," Proc. of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'12, Tokushima, Japan), pp. 15, 2006.

(国内発表)

居波正樹, 斎藤利通”周期しきい値を有する区分定数スイッチ力学系の基本分岐現象”

電子情報通信学会総合大会講演論文集 2012 年 基礎・境界, 71, 2012-03-06

居波正樹, 斎藤利通”目覚し時計を含む睡眠覚醒系に基づくスイッチ力学系について”

電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2012 年 (基礎・境界), 46, 2012-08-28

居波正樹, 斎藤利通”簡素なスイッチ力学系の所望周期解の探索と安定化について” 電

子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 基礎・境界, 22, 2013-03-05

居波正樹, 斎藤利通”簡素なスイッチ力学系のインパルス制御信号による安定化” 信学

技報, vol. 113, no. 383, NLP2013-148, pp. 103-106, 2014 年 1 月.

謝辞

本修士論文は著者が法政大学大学院工学研究科電気工学専攻に在学中に行ったものである。この研究は同大学理工学部電気電子工学科斎藤利通教授の指導下で行ったもので、全ての研究活動を遂行するにあたり同教授から大変御参考になる御指導・御鞭撻を沢山賜りました。ここに心から深謝いたします。 また法政大学理工学部電気電子工学科 斎藤利通研究室の皆様にはいろいろな有益な御討論・ご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。