

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-211334

(P2009-211334A)

(43) 公開日 平成21年9月17日(2009.9.17)

(51) Int.Cl.
G05D 19/02 (2006.01)

F I
G05D 19/02

テーマコード (参考)

D

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2008-52752 (P2008-52752)
(22) 出願日 平成20年3月4日(2008.3.4)

(71) 出願人 504174135
国立大学法人九州工業大学
福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号
(74) 代理人 100116573
弁理士 羽立 幸司
(74) 代理人 100136180
弁理士 羽立 章二
(72) 発明者 山川 烈
福岡県北九州市若松区ひびきの2-4 国立大学法人九州工業大学内
(72) 発明者 常盤 達司
福岡県北九州市若松区ひびきの2-4 国立大学法人九州工業大学内

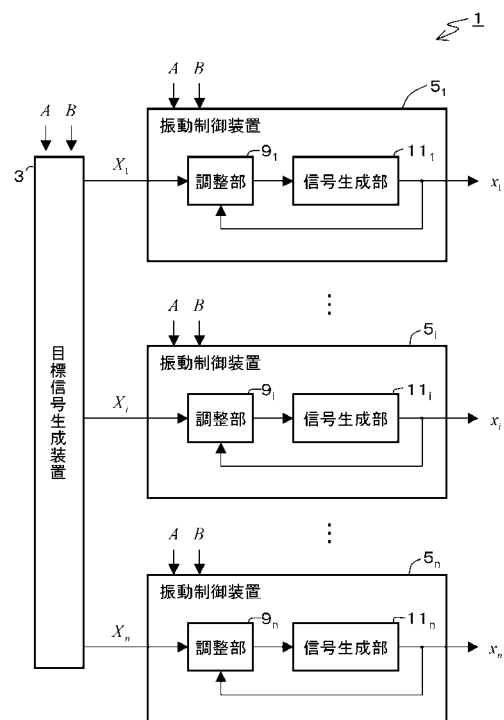
(54) 【発明の名称】 制御システム、振動制御装置及び制御信号生成方法

(57) 【要約】

【課題】 制御性に優れたCPG (Central Pattern Generator) ネットワークを実現可能な制御システム等を提案する。

【解決手段】 制御システム1 (CPGネットワーク) は、複数の振動制御装置 5_i (CPG) と一つの目標信号生成装置3 (リズムジェネレータ (RG)) から構成される。各CPGとRGは、Van der Pol方程式を用いて表現され、出力波形の振幅及び周期が外部信号によってほぼ独立に制御される。さらに、CPG間の位相差を制御するために、各CPGの唯一の結合であるCPGとRG間の結合を通して、各CPGの周期が一時的に制御される。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

目標信号を生成する目標信号生成装置と制御信号を生成する複数の振動制御装置を含む制御システムであって、

前記各振動制御装置は、

振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータに基づいて制御信号を生成する信号生成手段と、

前記目標信号及び前記制御信号に基づいて、前記振幅に関するパラメータ及び前記周期に関するパラメータの少なくとも一方を調整する調整手段、
を備える制御システム。

10

【請求項 2】

前記各振動制御装置の調整手段は、他の振動制御装置により生成された制御信号とは独立である、請求項 1 記載の制御システム。

【請求項 3】

i 番目 (i は前記振動制御装置の個数以下の自然数) の振動制御装置において、

前記信号生成手段は、(eq1) 式に基づいて信号 x_i を生成し、

前記調整手段は、 A_i 及び B_i の少なくとも一方を調整する、

請求項 1 又は 2 に記載の制御システム。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} - 2\varepsilon(A_i^2 - x_i^2) \frac{dx_i}{dt} + B_i^2 x_i = 0. \quad (\text{eq1})$$

20

ただし、

A_i, B_i : パラメータ、

ε : 非線形率、

【請求項 4】

前記目標信号生成装置は、(eq4) 式に基づいて i 番目 (i は前記振動制御装置の個数以下の自然数) の振動制御装置に対する目標信号 X_i を生成する、請求項 1 から 3 のいずれか記載の制御システム。

$$\frac{d^2 x_R}{dt^2} - 2\varepsilon(A^2 - x_R^2) \frac{dx_R}{dt} + B^2 x_R = 0, \quad (\text{eq2})$$

30

$$\tau = \frac{\max(x_R)}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)} = \frac{2A}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)}, \quad (\text{eq3})$$

$$X_i = c_{i1} x_R + c_{i2} \tau \frac{dx_R}{dt}. \quad (\text{eq4})$$

ただし、

A, B : パラメータ、

c_{i1}, c_{i2} : 定数。

40

【請求項 5】

前記調整手段は、前記目標信号と前記制御信号の位相差に基づき、前記振幅に関するパラメータ及び前記周期に関するパラメータの少なくとも一方を調整する、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の制御システム。

【請求項 6】

前記調整手段は、前記目標信号と前記制御信号の差を計算する差分演算手段を有する、請求項 1 から 5 のいずれかに記載の制御システム。

【請求項 7】

制御信号を生成する振動制御装置であって、

所定の目標信号及び生成された制御信号に基づいて、新たに生成する制御信号の振幅及

50

び周期の少なくとも一方を、互いに独立に調整する調整手段、
を備える振動制御装置。

【請求項 8】

制御信号を生成する制御信号生成方法であって、

所定の目標信号及び生成された制御信号に基づいて、振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータの少なくとも一方が調整される調整ステップと、

調整後の振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータに基づいて、新たな制御信号を生成する信号生成ステップ、
を含む制御信号生成方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願発明は、制御システム、振動制御装置及び制御信号生成方法に関し、特に目標信号を生成する目標信号生成装置と制御信号を生成する複数の振動制御装置を含む制御システム等に関する。

【背景技術】

【0002】

動物や人間などの生物の移動運動は、脊髄に存在するといわれているパターン発生器、つまり神経振動子 C P G (Central Pattern Generator) ネットワークによって生成・制御されているといわれている。なお、以下では、C P G ネットワークに含まれる複数の非線形振動子を C P G と呼び、C P G ネットワークと C P G を区別する。

【0003】

これまで、C P G ネットワークモデルとして、Matsuokaモデルなど、多くのモデルが提案され、実機(ロボット)への応用も行われている(非特許文献1、2、3参照)。Tagaは感覚入力を介してC P G ネットワークと筋骨格系が相互引き込みを起こすことを証明し、二足歩行のシミュレーションを行っている。Kimuraらは、Tagaモデルを拡張し、四脚歩行ロボットを作成し、C P G ネットワークの引き込み能力を利用して、不整地歩行を実現している。このように、C P G ネットワークは、生物が有する不整地歩行などの能力を説明可能なパターン発生器である。

【0004】

従来のC P G ネットワークモデルは、生体内の神経の構造・活動を模擬したモデルであり、各C P G が結合荷重を介して相互結合しており、一つのC P G 内に神経の疲労度や内部状態を表す神経が設計されている。

【0005】

これに対し、振動子同士の相互結合を用いず、位相の制御が可能な位相制御法として、Phase-lock Techniquesが知られている。Phase-Locked loop(PLL)は、Phase-lock Techniquesの具体例であり、Phase Detector(PD)とLow pass Filter(LF)とVoltage Controlled Oscillator(VCO)から構成される。PDでは二つの信号の位相差を検出し、VCOでは必要に応じて振動子の周期を制御する。ここで、VCOからの出力信号を制御信号、目標となる信号を目標信号とすると、PLLの動作原理は、制御信号と目標信号の位相差をPDで検出し、PDの出力信号をLFを介してVCOに入力し、VCOの値がゼロになるまでVCOにて制御信号の周期が制御される。

【0006】

Volkovskiiらは、PLLを用いたC P G ネットワークモデルを提案している(非特許文献4参照)。これは、C P G モデルとしてsin関数を用いているので、自励振動系ではないC P G ネットワークモデルである。また、Hoppensteadtらは、PLLネットワークモデルを提案している(非特許文献5参照)。これは、VCOとして正弦波関数が用いられており、さらに、モデルの応用としてはパターン認識に関するものを提案している。

【0007】

また、Van der Pol(VDP)方程式は、真空管において発生する振動現象を説明可

10

20

30

40

50

能な数理モデルである（非特許文献 6 参照）。VDP 方程式を用いた CPG ネットワークがいくつか提案されている（非特許文献 7 参照）。

【0008】

【非特許文献 1】K. Matsuoka 著, "The dynamic model of binocular rivalry," *Biological Cybernetics*, Vol.49, pp.201-208, 1984.

【非特許文献 2】G. Taga, 外 2 名著, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics*, Vol.65, pp.147-159, 1991.

【非特許文献 3】H. Kimura, 外 2 名著, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts," *International Journal of Robotics Research*, Vol.26, pp.475-490, 2007. 10

【非特許文献 4】A. Volkovskii, 外 5 名著, "Analog electronic model of the lobster pyloric central pattern generator," *Journal of Physics, Conference Series*, Vol.23, pp.47-57, 2005.

【非特許文献 5】Frank C. Hoppensteadt, 外 1 名著, "Pattern Recognition Via Synchronization in Phase-Locked Loop Neural Networks," *IEEE Transactions on neural networks*, Vol.11, No.3, 2000.

【非特許文献 6】Van der Pol 著, "On relaxation oscillations," *Phil. Mag.*, No.2, pp.987-993, 1926.

【非特許文献 7】Max S. Dutra, 外 2 名著, "Modeling of a bipedal locomotor using coupled nonlinear oscillators of Van der Pol," *Biological Cybernetics*, No.88, pp.286-292, 2003. 20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、移動運動生成のためには、CPG は、引き込み能力を持つ振動子（自励振動系：二階以上の微分非線形微分方程式で表現される）であり、周期と振幅が制御可能である必要がある。CPG ネットワークは、複数の CPG から構成されており、CPG 間の位相差が制御される必要がある。さらに、最終的に制御された各 CPG の出力値は、振幅・周期が同じでなければならない。 30

【0010】

一方、非特許文献 1、2、3 などに記載された従来の CPG ネットワークモデルは、高次の非線形微分方程式で表現される CPG が結合荷重を介して相互結合をしたネットワーク構造をしている。そのため、各 CPG の出力波形の制御が難しく、結合荷重やネットワーク構造の設計が困難であるという問題がある。例えば、従来の結合荷重の設計は、試行錯誤や遺伝的アルゴリズムなどのニューラルネットワークを用いて行われていた。しかし、いずれの場合も、計算量・時間がかかるものであった。さらに、実機（ロボット）への搭載を考慮した場合、各 CPG の出力波形の振幅・周期及び CPG 間の位相差は、独立に制御できるほうが望ましい。

【0011】 40

また、非特許文献 4 に記載されているように、PLL を CPG ネットワークに応用する場合、VCO が CPG に対応する。ここで、所望の位相差を持つ目標信号が設計可能であると仮定し、PLL を必要な個数用意すると、任意の位相差を持つ信号が生成制御できるので、CPG ネットワークが設計可能であるとも考えられる。しかしながら、PD の設計方法に関して問題が生じる。すなわち、PD の設計法には、減算法と乗算法の二つがある。減算法は VCO として sin 関数などの正弦波が用いられるので CPG には応用できない。乗算法は VCO として正弦波以外に周期的な波にも使用可能であるが、各振動子の振幅がずれたまま位相が制御される場合があるので、CPG ネットワークに応用することができない。

【0012】 50

さらに、VDPは自励振動系であり、振幅と周期がほぼ独立に制御可能なモデルである。したがって、VDPは、CPGモデルとして適していると考えられる。しかしながら、非特許文献7などに記載されたモデルは、どれもVDPの特長である、周期・振幅の制御性を保持していないCPGネットワークである。

【0013】

そこで、本願発明は、制御性に優れたCPGネットワークを実現可能な制御システム等を提案することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

請求項1に係る発明は、目標信号を生成する目標信号生成装置と制御信号を生成する複数の振動制御装置を含む制御システムであって、前記各振動制御装置は、振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータに基づいて制御信号を生成する信号生成手段と、前記目標信号及び前記制御信号に基づいて、前記振幅に関するパラメータ及び前記周期に関するパラメータの少なくとも一方を調整する調整手段、を備えるものである。

10

【0015】

請求項2に係る発明は、請求項1記載の制御システムであって、前記各振動制御装置の調整手段が、他の振動制御装置により生成された制御信号とは独立である。

【0016】

請求項3に係る発明は、請求項1又は2に記載の制御システムであって、 i 番目 (i は前記振動制御装置の個数以下の自然数)の振動制御装置において、前記信号生成手段は、(eq1)式に基づいて信号 x_i を生成し、前記調整手段は、 A_i 及び B_i の少なくとも一方を調整するものである。

20

【0017】

請求項4に係る発明は、請求項1から3のいずれか記載の制御システムであって、前記目標信号生成装置が、(eq4)式に基づいて i 番目 (i は前記振動制御装置の個数以下の自然数)の振動制御装置に対する目標信号 X_i を生成するものである。

【0018】

請求項5に係る発明は、請求項1から4のいずれかに記載の制御システムであって、前記調整手段が、前記目標信号と前記制御信号の位相差に基づき、前記振幅に関するパラメータ及び前記周期に関するパラメータの少なくとも一方を調整するものである。

30

【0019】

請求項6に係る発明は、請求項1から5のいずれかに記載の制御システムであって、前記調整手段が、前記目標信号と前記制御信号の差を計算する差分演算手段を有するものである。

【0020】

請求項7に係る発明は、制御信号を生成する振動制御装置であって、所定の目標信号及び生成された制御信号に基づいて、新たに生成する制御信号の振幅及び周期の少なくとも一方を、互いに独立に調整する調整手段、を備えるものである。

【0021】

請求項8に係る発明は、制御信号を生成する制御信号生成方法であって、所定の目標信号及び生成された制御信号に基づいて、振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータの少なくとも一方が調整される調整ステップと、調整後の振幅に関するパラメータ及び周期に関するパラメータに基づいて、新たな制御信号を生成する信号生成ステップ、を含むものである。

40

【0022】

なお、前記目標信号は、設計者により定義された条件を満たすように生成されたものであってもよい。特に、請求項4にかかる発明において、(eq4)の定数 c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせが所定の条件を満たすように自動的に生成されたものであってもよい。

【0023】

また、ある振動制御装置の調整手段が、与えられた目標信号以外にも、例えば、外部信

50

号や他の振動制御装置の制御信号に基づいて新たに生成する制御信号の振幅及び周期の少なくとも一方を調整するものであってもよい。

【0024】

さらに、本願発明を、コンピュータにおいて各請求項に記載された発明を実現するためのプログラムやこのプログラムを記録する記録媒体などとして捉えてもよい。

【0025】

【数1】

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} - 2\varepsilon(A_i^2 - x_i^2) \frac{dx_i}{dt} + B_i^2 x_i = 0, \quad (\text{eq1})$$

$$\frac{d^2 x_R}{dt^2} - 2\varepsilon(A^2 - x_R^2) \frac{dx_R}{dt} + B^2 x_R = 0, \quad (\text{eq2})$$

$$\tau = \frac{\max(x_R)}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)} = \frac{2A}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)}, \quad (\text{eq3})$$

$$X_i = c_{i1} x_R + c_{i2} \tau \frac{dx_R}{dt}. \quad (\text{eq4})$$

ただし、

A_i, B_i : パラメータ,

ε : 非線形率,

A, B : パラメータ,

c_{i1}, c_{i2} : 定数.

【発明の効果】

【0026】

本願の各請求項に係る発明（以下、「本願発明」という。）によれば、各振動制御装置が独立に振動系を持ち、ネットワーク構造により各振動制御装置を制御可能となり、制御性に優れたCPGネットワークが実現可能となる。

【0027】

さらに、本願発明により実現されるCPGネットワークは、各CPG同士が荷重結合を介して相互結合をしておらず、例えばCPGネットワークの結合構造は歩様遷移図などをもとに一意に設計可能であり、結合荷重の設計を簡略化することができる。

【0028】

さらに、請求項3にあるように、VDP方程式を用いて、VDP方程式の特徴を保持したCPGネットワークが構築可能となる。そのため、各CPGから出力される信号の振幅・周期・位相差をほぼ独立に制御可能となり、これらの設計・制御が容易な、制御性に優れたCPGネットワークが実現可能となる。

【0029】

さらに、請求項6にあるように、出力値の減算処理を用いて目標信号（目標とする信号）と制御信号（制御する信号）の振幅・周期・位相を揃えることにより、CPGネットワークを実現可能となる。

【0030】

本願発明の応用としては、例えば、制御性が重要視されるロボットなどが考えられる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0031】

以下では、図面を参照して、本願発明の実施の形態について説明する。

【実施例1】

【0032】

図1は、本願発明の実施の形態に係る制御システム1の概略ブロック図である。

【0033】

10

20

30

40

50

制御システム 1 には、目標信号を生成する目標信号生成装置 3 と、制御信号を生成する n 個の振動制御装置 5_1 、 \dots 、 5_n が含まれる。

【0034】

本実施例においては、目標信号生成装置 3 及び振動制御装置 5_1 、 \dots 、 5_n は、VDP 方程式を用いて設計される。そこで、まず、VDP 方程式について説明する。

【0035】

VDP 方程式は、1926年にVan der Polによって提案された、真空管内で起こる振動現象を説明する方程式である（非特許文献 6 参照）。VDP 方程式は自励振動系（Limit cycleを持つ）である最も単純なモデルの一つであり、(1)式によって表わされる。

【0036】

ここで、 A 、 B はそれぞれパラメータである。 β は非線形率を表し、この値が小さい範囲（ $0 < \beta < 1$ ）では、VDP は正弦波振動を行う。 $\beta = 0$ の場合、VDP は調和振動子になり、Kryloff と Bogoliuboff が提案した近似法（Luis A. Pipes、外 1 名著，“Mathematics for engineers and physicists”，McGrawHill Education, Third Edition, 1970 参照）によると、調和振動子の解は、 a と θ を用いて、(2)式で表現できる。さらに、Kryloff と Bogoliuboff の解法を用いて(3)式及び(4)式が得られる。

【0037】

(3)式より、VDP の出力値の振幅は、 $da/dt = 0$ のときに安定状態に落ち着き、その値は $a = 2A$ になることがわかる。なお、実際のシミュレーションでは、振幅は正確に $2A$ になるとは限らない。これは、この解析が近似を用いた解法であるからである。

【0038】

また、(4)式より、VDP の出力値の位相は時間に依存せず一定であることがわかる。

【0039】

さらに、 a と θ が定数のとき、(2)式より、VDP の出力波形の周期はパラメータ B で制御できることがわかる。

【0040】

以上より、任意定数 a 及び θ に対して、(2)式と(3)式より、VDP の出力値の振幅と周期は、それぞれ A と B によって独立に制御可能であり、周期は B に反比例し、振幅は $2A$ になる。

【0041】

図 2 は、VDP 方程式の出力波形の振幅と周期を測定したシミュレーション結果を示す図である。 $\beta = 0.2$ 、初期値として、 $x = 0.5$ 、 $dx/dt = 0.1$ を用いた。 $A = 0$ では、VDP は減衰振動を示し、 $A < B$ の範囲で VDP は振動を続けた。図 2 より、VDP の出力波形の振幅と周期は、パラメータ A 及び B によってそれぞれほぼ独立に制御可能であることが確認できる。以上のように、VDP は自励振動系であり、振幅と周期の独立制御性を持っているので、制御性に優れた CPG ネットワークの設計のために有用であると考えられる。

【0042】

図 1 を参照して、目標信号生成装置 3 は、外部より与えられるパラメータ A 及び B に基づいて、VDP 方程式を利用して、振動制御装置 5_i (i は n 以下の自然数) に対する目標信号 X_i を生成する。各振動制御装置 5_i の振幅・周期を揃えるために、目標信号 X_i によって、各 VDP の振幅・周期制御項を一律に制御する。この処理により、外界の変化に応じて波形を一律に制御可能な CPG ネットワークの設計が可能となる。

【0043】

振動制御装置 5_i は、外部よりパラメータ A 及び B が与えられ、これらを調整して得られるパラメータ A_i 及び B_i に基づいて、(5)式により制御信号 x_i を生成する。信号制御装置 5_i は、目標信号 X_i 及び生成された制御信号 x_i に基づいて、パラメータ A_i 及び B_i の少なくとも一方を調整する調整部 9_i と、調整部 9_i による調整後のパラメータに基づいて新たに制御信号 x_i を生成する信号生成部 11_i を備える。

【0044】

10

20

30

40

50

図1において、振動制御装置 5_1 、 \dots 、 5_n は互いに独立であり、それぞれ、目標信号生成装置3により生成された目標信号 X_1 、 \dots 、 X_n を用いて制御信号を生成する。さらに、各振動制御装置 5_1 、 \dots 、 5_n において、生成される制御信号の振幅及び周期はほぼ独立に調整可能である。そのため、例えば歩様を実現するにあたり、振動制御装置を各脚に対応して設けることにより、各脚は互いに独立に制御可能となり、さらに、二脚、三脚など、任意の脚数に対応可能となる。このように、例えば振動制御装置の数の変化にも対応可能であり、本願発明によりロバストなシステムを実現可能である。このようなシステムは、歩様などの動作の本質に着目したことにより実現しえたものである。

【0045】

【数2】

10

$$\frac{d^2x}{dt^2} - 2\varepsilon(A^2 - x^2)\frac{dx}{dt} + B^2x = 0, \quad (1)$$

$$x = a \sin(Bt + \phi), \quad (2)$$

$$\frac{da}{dt} = a\varepsilon\left(A^2 - \frac{a^2}{4}\right), \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} - 2\varepsilon(A_i^2 - x_i^2)\frac{dx_i}{dt} + B_i^2x_i = 0. \quad (5)$$

20

【0046】

続いて、VDPを用いた振動制御装置 5_i の設計について具体的に説明する。ただし、より一般的に、VDPを用いた、CPGネットワーク(図1の制御システム1に対応)を構成する n 個のCPG(図1の振動制御装置 5_i に対応)の設計について、周期に関するパラメータ B_i のみを調整する場合について具体的に説明する。すなわち、以下の説明では、各CPGにおける振幅に関するパラメータ A_i は調整せず、外部より与えられるパラメータ A と等しいものとする。このように、本願発明は、少なくとも周期に関するパラメータを調整するものであってもよい。

【0047】

30

図3は、提案するCPGモデルである $CPG_{i,21}$ のブロック図である。 $CPG_{i,21}$ は、図1の調整部 9_i に対応する調整部23と、図1の信号生成部 11_i に対応するVDP 25 を備える。

【0048】

i 番目のCPG $_i$ のVDP方程式(VDP $_i$)は、(6)式で表現される。

【0049】

本実施例では、VDPの特徴である振幅と周期の制御性を保持したままCPG間の位相差を制御するために、以下の方法を用いる。まず、各CPGの出力値 x_i に対する所望の位相差を持つ信号を目標信号 X_i とし、 X_i が既知であると仮定する。そして、 x_i と X_i の位相差がゼロになるようにCPG $_i$ の周期を一時的に制御することで、CPG間の位相差を制御する方法を考察する。

40

【0050】

x_i と X_i の差を取り、その値がゼロになるように各CPGの周期のみを制御する。この操作は(7)式のように表現できる。ここで、 b_i は i 番目のCPG $_i$ の出力波形の周期を一時的に制御するパラメータであり、 k は x_i と X_i の差を周期制御にどのくらい反映させるかを決定するための係数である。以下では、常に $k = 1$ とする。

【0051】

次に、 b_i を用いて、(6)式で表現されるCPG $_i$ のパラメータ B_i (周期に関するパラメータ)を、(8)式を用いて制御する。(8)式の物理的意味は、パラメータ B が各CPGの自然周波数を表し、 b_i が i 番目のCPG $_i$ の出力波形 x_i に対する目標信号 X_i の位相のずれ

50

を表現している。

【 0 0 5 2 】

(7)式及び(8)式により表現される処理を x_i と X_i の差がなくなるまで繰り返す。この処理により、目標信号 X_i が既知の状態では、各 C P G の出力値 x_i は目標信号 X_i と同位相の信号を生成することが可能になり、結果的に C P G 間の位相を制御することが可能になる。

【 0 0 5 3 】

【数 3】

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} - 2\varepsilon(A^2 - x_i^2) \frac{dx_i}{dt} + B_i^2 x_i = 0, \quad (6)$$

10

$$b_i = k(x_i - X_i), \quad (7)$$

$$B_i = B + b_i. \quad (8)$$

【 0 0 5 4 】

続いて、V D P を用いた目標信号生成装置 3 (目標信号を生成する振動子であり、以下ではリズムジェネレータ (R G) という。) の設計について具体的に説明する。

【 0 0 5 5 】

各 C P G に固有の目標信号を設定するためには、設計する歩様を定義する必要がある。本実施例では、図 4 に示す四脚歩行動物の代表的な歩様信号を生成する。図 4 は、四脚歩行動物の代表的な歩様の遷移図である。(a) は walk モード、(b) は trot モード、(c) は bound モード、(d) は gallop モードである。図 4 において、L F、R F、L H、R H は、それぞれ左前脚、右前脚、左後脚、右後脚を表す。矢印は、位相遷移方向を表し、イコールは位相が同期していることを示す。

20

【 0 0 5 6 】

図 4 より、制御すべき C P G 間の位相差は、0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の四種類のみであることが確認できる。これらの位相差を表現するための目標信号を生成する方法を考察する。

【 0 0 5 7 】

(7)式に関して述べたとおり、目標信号の条件として、各 C P G の出力値 x_i と目標信号 X_i の位相差がゼロになった後 $x_i - X_i = 0$ になる必要がある。さらに、目標信号は、一つの波形を基準として 0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の四種類の位相差を持つ波形を生成する必要がある。

30

【 0 0 5 8 】

リズムジェネレータを、V D P 方程式を用いて設計する方法を考察する。

【 0 0 5 9 】

図 5 は、提案するリズムジェネレータである R G 3 1 のブロック図である。図 5 において、V D P_{R 3 3} は R G を構成する V D P であり、出力信号は添え字の R を用いて表現する。V D P 方程式を用いて R G を設計することで、V D P 内で計算処理されている x_R 、 dx_R/dt に \pm を付加し、目標信号 X_i とすることができる。これにより、 x_R を基準波形として上述の四種類の位相差が表現可能となる。一例として、 $X_1 = x_R$ 、 $X_2 = dx_R/dt$ とすると、制御後の x_1 と x_2 の位相差は $\pi/2$ となる。ただし、これは V D P が安定解を持つ範囲内で使用されることを前提条件とする。

40

【 0 0 6 0 】

図 5 において、目標信号選択部 3 5 は、n 個の C P G それぞれについて、図 4 の歩様遷移図に基づき、入力された 4 つの信号から 1 つの出力値 X_i を選択する。各 C P G には、パラメータ A と B と同じ値が入力され、目標信号 X_i として、目標信号選択部 3 5 により選択された $\pm dx_R/dt$ と $\pm x_R$ のどれか一つが用いられる。(9)式は、これを数式で表現したものである。

【 0 0 6 1 】

ここで、本実施例においては、 c_{i1} 、 c_{i2} は 0、- 1、1 のどれかの値をとる。加えて

50

、 c_{i1} と c_{i2} は必ずどちらかがゼロであり、同時にゼロになることはないという条件を持つ。式中の τ は二つの役割を持つ。一つは、時定数であり x_R と dx_R/dt のどちらかで表わされる X_i の次元を常に x_R の次元に合わせるためである。二つ目は、 x_R と dx_R/dt の出力波形の振幅を常に一定に保つためである。これは、パラメータAとBの値によっては、 x_R と dx_R/dt の出力波形の振幅が異なる場合があり、この状況に対処するためである。よって、 τ は(10)式によって計算される。 \max 関数は、出力波形 x_R と dx_R/dt の振幅を表現している。出力波形 x_R の振幅は、理論上、 $2A$ となる。

【0062】

【数4】

$$X_i = c_{i1}x_R + c_{i2}\tau \frac{dx_R}{dt}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{\max(x_R)}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)} = \frac{2A}{\max\left(\frac{dx_R}{dt}\right)}. \quad (10)$$

【0063】

RGと各CPGはどちらもVDPを用いて設計されるが、各CPGは実際のロボットへ搭載するセンサからのフィードバック信号や、目標信号 X_i が入力される点でRGと構造が異なる。

【0064】

なお、本実施例は、従来のCPGネットワークの相互結合・結合荷重の問題を解決するために、Phaselock Techniquesに注目してはいるものの、本実施例では、二つの振動子の振幅・位相を揃えるために、二つの振動子の出力値の減算を行う処理を用いている。減算処理の出力値は、目標信号と制御信号の振幅、位相が同じ場合にはゼロになるが、必ずしも二つの振動子の位相差に比例していない。そのため、PDではない。つまり、減算処理を用いたPhaselock TechniquesはPLLではないといえる。

【0065】

続いて、図3のCPG_i及び図5のRGを用いて、四脚歩行動物のためのCPGネットワークの設計について説明する。

【0066】

図6は、四種類の歩様生成のためのCPGネットワークの構造の一例を示す図である。(a)はwalkモード、(b)はtrotモード、(c)はboundモード、(d)はgallopモードである。

【0067】

まず、RGを一個と、必要な個数(n個)のCPGを用意する。本実施例では四脚歩行のための移動運動信号の生成・制御を行うので、CPGは4個(n=4)必要となる。RGと各CPGには、振幅と周期を決定するパラメータA及びBをそれぞれ入力する。

【0068】

各CPGは、各脚に対応させる。本実施例では、CPG₁、CPG₂、CPG₃、CPG₄を、それぞれLF、RF、LH、RHとする。

【0069】

各CPGの目標信号 X_i は、図4に示す歩様遷移図をもとに決定する。以下では、walkモードにおける X_i (1 ≤ i ≤ n)の決定法を説明する。

【0070】

x_1 はLFに対応し、CPG間の位相を考慮する場合、四つの足の基本波形になるので、目標信号 X_1 として x_R を入力する。

【0071】

x_2 、 x_3 、 x_4 は、それぞれRF、LF、RHに対応し、LFに比べて位相差がそれぞれ $\pi/2$ 、 $\pi/2$ であるので、それぞれ、目標信号 X_2 、 X_3 、 X_4 として $-x_R$ 、 dx_R/dt 、 $-dx_R/dt$ を入力する。

【0072】

10

20

30

40

50

walkモードにおけるCPGネットワークを(9)式と対応させると、 $c_{11} = 1$ 、 $c_{21} = -1$ 、 $c_{31} = 0$ 、 $c_{41} = 0$ 、 $c_{12} = 0$ 、 $c_{22} = 0$ 、 $c_{32} = 1$ 、 $c_{42} = -1$ となる。同様に、trot、bound、gallopモードに関しても、歩様遷移図をもとに一意的にネットワークが設計できる。さらに、それぞれの歩様における c_{i1} と c_{i2} の値をまとめると、表1に示す通りになる。

【0073】

【表1】

i	x_i	walk		trot		bound		gallop	
		c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}
1	x_1	1	0	1	0	1	0	1	0
2	x_2	-1	0	-1	0	1	0	0	-1
3	x_3	0	1	-1	0	-1	0	0	1
4	x_4	0	-1	1	0	-1	0	-1	0

10

【0074】

なお、図7は、本願発明の他の実施例に係る制御システム41の概略ブロック図であるが、例えば図10にあるように、目標信号生成装置43はVDR方程式に基づいて基本的な信号 x_R 、 dx_R/dt を生成し、目標信号選択装置45_iは、信号 x_R 、 dx_R/dt に対して、係数 c_{i1} 、 c_{i2} を用いて(9)式にあるようにして計算を行い、n個の振動制御装置47_iは、それぞれ、目標信号選択装置45_iにより選択された信号に基づいて出力信号 x_i を生成するようにしてもよい。

20

【0075】

また、さらに他の実施例として、図7を参照して、目標信号生成装置43は、各振動制御装置47_iに必要な信号(例えば4つの信号 x_R 、 $-x_R$ 、 dx_R/dt 、 $-dx_R/dt$)を生成し、目標信号選択装置45_iはこれらの信号から必要に応じて1つの信号を選択するものであってもよい。

【0076】

このように、目標信号生成装置(リズムジェネレータ)は、図7にあるように、基本的な信号を生成するものとして捉えてもよく(上記実施例では x_R 及び dx_R/dt という2信号型)、これらの信号に対して-1倍等の演算を行い、必要な信号を生成する部分も含めて捉えてもよく(上記実施例では4信号型)、さらに、図5にあるように、各振動制御装置(CPG)に与える信号を特定する部分も含めて捉えてもよい(上記実施例ではn信号型)。

30

【実施例2】

【0077】

続いて、図8、9、10を参照して、Matlabを用いたシミュレーションにより、提案モデルの有効性を示す。非線形微分方程式の解法として、4次のルンゲクッタ法を用いた。

【0078】

図8は、walkモードにおける各CPGの出力信号 x_i と b_i の遷移を示す図である。(a)は各CPGの出力信号 x_i の遷移を示し、(b)は b_i の遷移を示す。 $\omega = 0.2$ 、 $k = 1$ 、初期値として、 $x_R = 0.1$ 、 $x_1 = 0.1$ 、 $x_2 = -0.5$ 、 $x_3 = 0.3$ 、 $x_4 = 0.7$ 、 $dx_R/dt = 0.1$ 、 $dx_1/dt = 0.1$ 、 $dx_2/dt = 0.3$ 、 $dx_3/dt = 0.3$ 、 $dx_4/dt = 0.2$ を用いた。さらに、振幅と周波数を決定するパラメータは、 $A = 0.5$ 、 $B = 1$ とした。 b_i は x_i の目標信号 X_i との位相のずれを表している。本実験では、 $b_i < 0.3$ 以下をゼロとして処理した。この処理は、A、Bのパラメータによっては、 x_i と X_i の位相が同期した後でも、(8)式中の b_i が完全にゼロにならない場合があるからである。出力結果より、各CPGの出力波形の位相差が $\pi/2$ となるように、各CPGの周期が b_i により制御されていることがわかる。また、各CPGの出力値が各目標信号に制御された後は、 b_i は0になっていることが確認できる。

40

50

【 0 0 7 9 】

図 9 は、trot、bound、gallop モードにおける各 C P G の出力信号 x_i の遷移を示す図である。図 9 において、(a) は trot モードの、(b) は bound モードの、(c) は gallop モードのシミュレーション結果を表す。 k 、 A 、 B 、初期値として、 x_R 、 dx_R/dt 、 x_i と dx_i/dt は walk モードでのシミュレーション条件と同じものを用いている。図 9 より、図 4 に示す歩様遷移図と同じ位相差を持つ信号が生成・制御されていることが確認できる。また、図 8 (a)、図 9 (a)、(b)、(c) の出力結果は、それぞれ同じパラメータ A と B を用いているので、各歩様において振幅と周期がそれぞれ同一の値をとっていることが確認できる。また、各モードの出力値は、C P G₁ の出力値である x_1 を基準として所望の位相差を持つ波形 (x_2 、 x_3 、 x_4) が生成制御されていることが確認できる。

10

【 0 0 8 0 】

図 10 は、walk モードにおけるパラメータ A と B を調整させた場合の実験結果である。(a) は $A = 0.5$ 、 $B = 0.6$ のとき、(b) は $A = 0.5$ 、 $B = 1$ のとき、(c) は $A = 0.8$ 、 $B = 1$ のときである。 k 、初期値として、 x_R 、 dx_R/dt 、 x_i と dx_i/dt は、上述の値をそのまま用いた。図 10 より、ネットワーク構造においても、各 C P G の出力波形の振幅・周期がそれぞれ独立に制御可能であることが確認できる。さらに、既述のとおり、V D P の出力波形の振幅はパラメータ A の 2 倍、振幅は B に反比例していることが確認できる。このように、パラメータ A と B によって出力波形の振幅と周期がそれぞれ独立に制御可能であることが確認できる。また、各信号の周期 T の測定結果は、(a) が 10

20

【 0 0 8 1 】

以上のように、本実施例では、C P G ネットワークを構成する各 C P G が Limit cycle を持っており、R G によって C P G 間の位相差のみが制御される。さらに、各 C P G は出力値の振幅と周波数がほぼ独立に制御可能な非線形微分方程式である V D P を用いて表現される。そのため、制御性の高い C P G ネットワークの設計が可能となる。

【 実施例 3 】

【 0 0 8 2 】

続いて、目標信号選択装置 (図 5 の目標信号選択部 3 5、図 7 の目標信号選択装置 4 5₁、 \dots 、4 5_n 参照) につき、他の実施例を説明する。

30

【 0 0 8 3 】

(9) 式の係数 c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせを、ある条件の下で自由に選ぶことにより、条件を満たす歩様を自由に切り替えることが可能となる。そこで、代表的な歩様 (例えば、図 4 及び表 1 参照) の c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせから、規則を見つけ、それを条件とする。

【 0 0 8 4 】

表 1 を参照して規則の例を説明する。 x_1 は、基本波形として固定する ($c_{i1} = 1$ 、 $c_{i2} = 0$)。表 1 より、 c_{i1} の総和及び c_{i2} の総和はゼロである ($\sum c_{i1} = \sum c_{i2} = 0$)。また、 c_{i1} と c_{i2} の和は 1 又は - 1 である ($c_{i1} + c_{i2} = 1$ 又は - 1)。このことから、以下に説明するように、C P G ネットワークにおける拘束 (下記条件 1 及び条件 2) 及び生物の歩様における拘束 (条件 3) に基づいて 3 つの条件を作成し、目標信号選択装置は、その条件のもとで、 c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせを決定する。

40

【 0 0 8 5 】

第 1 の条件 (条件 1) は、すべての生成波形の総和はゼロであることである ($\sum c_{i1} = \sum c_{i2} = 0$)。第 2 の条件 (条件 2) は、 x_i と dx_i/dt は同時に結合されないことである ($c_{i1} + c_{i2} = 1$ 又は - 1)。第 3 の条件 (条件 3) は、同側の前足と後足は同位相になることはないことである ($c_{21} = c_{41}$ 、かつ、 $c_{31} = 1$)。

【 0 0 8 6 】

上記の 3 つの条件を全て同時に満たす歩様は、walk、trot、bound、gallop モード (図 4、表 1 参照) 以外に、4 つ存在する。表 2 は、walk、trot、bound、gallop モード以外

50

の4つの歩様の c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせを示す表である。また、図11は、図4に記載されたwalk、trot、bound、gallopモード以外の歩様の遷移図である。

【0087】

これより、上記の3つの条件を満たすパラメータセットは8種類であり、設計者が定義した条件歩様を満たす歩様の獲得が可能となる。

【0088】

【表2】

i	x_i	歩様1		歩様2		歩様3		歩様4	
		c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}	c_{i1}	c_{i2}
1	x_1	1	0	1	0	1	0	1	0
2	x_2	-1	0	0	-1	0	1	0	1
3	x_3	0	-1	-1	0	-1	0	0	-1
4	x_4	0	1	0	1	0	-1	-1	0

10

【0089】

図12を参照して、シミュレーションにより、提案モデルの有効性を示す。実験及びシミュレーション条件は、上記の条件1・2・3を全て同時に満たす c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせを乱数で生成することである。ただし、乱数がとり得る値は、-1、0、1の3種類の中から選択される。CPGネットワーク構造は、1500ステップごとに乱数を発生させて変更される。

20

【0090】

図12は、自動的に生成された c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせによる、(a)各CPGの出力信号 x_i の遷移及び(b) b_i の遷移を示す図である。横軸はステップ数を表す。自動生成された c_{i1} 及び c_{i2} の組み合わせは、1500ステップまではgallopモード、1501~3000ステップは歩様4モード、3001~4500ステップはtrotモードである。図12より、指定された条件を満たす歩様を自動的に生成可能であることが分かる。この条件のもと生成される8種類の信号は、一つの脚が動いている間、常に他の三本脚が地面に着地しているので、安定した移動が期待できる。よって、これらの位相関係で制御される信号は、歩様信号と考えることができる。

30

【実施例4】

【0091】

続いて、図13~図15を参照して、多様な位相差を生成する機構について、他の実施例を説明する。以下に説明するように、このような位相差の生成を行うことにより、リズムジェネレータRGで生成された基本的な信号による位相差を微調整したり、脚数の変化に対応したりすることが可能となる。

【0092】

図13は、本願発明の他の実施例に係る振動制御装置51_i(i はシステムにおける振動制御装置の個数 n 以下の自然数)の概略ブロック図である。振動制御装置51_iは、図1の振動制御装置5_iと同様に外部のリズムジェネレータより目標信号 X_i が入力される。図13において、調整部53_iには外部からの信号(外部信号) e_i が入力される。また、調整部53_iには、他の振動制御装置から制御信号 x_1 、 \dots 、 x_{i-1} 、 x_{i+1} 、 \dots 、 x_n が入力される。

40

【0093】

まず、調整部53_iが外部信号 e_i を用いて位相差を調整する場合について説明する。本実施例では、(8)式に代えて $B_i = B + b_i + e_i$ を用いる。図14は、1500ステップまではRGを用いて位相差制御を行い、1500ステップ以降は外部信号を利用した場合の(a)各CPGの出力信号 x_i の遷移及び(b) b_i の遷移を示す図である。800~1500ステップは、boundモードである。調整部53_iは、外部信号 e_i (1500~1550ステップにおいて外部信号 $e_2 = 0.2$ であり、他の部分では $e_i = 0$ である。)に基づき、 B_i を調整する。図14

50

より、位相差が変更されていることが分かる。以上より、図14により、外部信号を利用することで、任意の位相差を持つ波形を生成可能であることが分かる。

【0094】

次に、調整部53_iが、例えば振動制御装置の数が変更した場合などに、他の振動制御装置の制御信号を用いて位相差を調整する場合について説明する。(一周期×1/n)ずれ波形は、 x_i の総和がゼロ($\sum x_i = 0$)という関係が必ず成り立つ。これにより、(一周期×1/n)ずれの位相差を持つ波形を生成制御することが可能となる。図15は、1500ステップまではRGを用いて位相差制御を行い、1501ステップ以降は制御信号 x_i の総和がゼロとなるように b_i を制御した場合の(a)各CPGの出力信号 x_i の遷移及び(b) b_i の遷移を示す図である。1000~1500ステップは、walkモードであり、位相差は2/4である。ここで、右前脚(x_2)への信号出力部が壊れたと仮定する。この場合、制御信号を生成可能なものは、左前脚(x_1)、左後脚(x_3)、右後脚(x_4)である。そこで、1500ステップ以降は、RGを用いず、 $x_2 = 0$ として、 x_i の総和がゼロとなるように b_i を制御する。これにより、位相差を2/3とすることができる。図15により、脚数変化にも適応可能であることが分かる。

10

【0095】

なお、例えば、特開2006-289602号公報には、引き込み特性を持つ振動子を用いて可動部の周期運動の制御を行うロボット装置が記載されている。これは、位相差を揃えるものではあるが、本願発明とは、振幅と周期の独立制御性を有さない点、振動子の引き込みを利用している点(本願発明は、周期を直接制御可能)、Matsuokaモデルを信号生成部で利用している点で異なるものである。

20

【0096】

本実施例のCPGネットワークに用いられるVDPは、安定解を持つ範囲内でのみ使用される。つまり、提案モデルで表現できる正弦波振動の振幅と周期は制限されることになる。しかし、実際の四脚歩行ロボットの各脚の移動範囲は構造的に決まっており、その範囲を超えて動かす必要はないので、一つのVDPで表現可能な出力波形の出力範囲と各脚の挙動範囲を対応させることでこの問題を解決できると考えられる。

【0097】

また、四脚歩行動物は、walk、trot、bound、gallopモードと歩様が遷移するに従って、歩行スピードが速くなる。これに対し、本提案手法は、歩様が変化しても歩行スピード(周期)は一定なので、歩様遷移が行われた場合、さらに歩行スピードを決定するためにVDP内のパラメータBを制御する必要がある。

30

【0098】

しかし、本実施例は、振幅と周期がほぼ独立に制御可能であり、位相差、振幅を固定したまま、歩行スピード(周期)を制御可能であるので、歩様遷移に対処可能である。

【0099】

さらに、実際の歩行動物は、一つの脚が何かに躓いたりすると、他の脚は躓いた脚に影響を受けて巧みに動きを変えながら安定した歩行を続ける。本実施例では、各CPGは相互結合をしていないが、例えば、センサーフィードバックを利用する方法が有効であると考えられる。体のバランスをセンサする信号を各CPGにフィードバックさせ、体のバランスに応じて各CPGが、影響を及ぼしあうCPGネットワークは有効であると考えられる。センサ等の外部装置を付加することで、例えば、歩様は一定のまま歩行周期を調節可能(移動運動の速さを調節可能)となったり、歩様は一定のまま、例えば歩幅を広くするなど歩幅を変更し、設計者が任意にエネルギー関数を設定することで、設計者の好みに応じた歩様を生成可能となったり、一部の脚の歩幅を変更したり、脚数の変化に対応した歩行運動生成のための信号を生成したりすることができる。このようなことは、従来のCPGネットワークでは実現が困難であったものである。

40

【図面の簡単な説明】

【0100】

【図1】本願発明の実施の形態に係る制御システム1の概略ブロック図である。

50

【図2】VDP方程式の出力波形の振幅と周期を測定したシミュレーション結果を示す。

【図3】提案するCPGモデルであるCPG_i 2 1 (図1の振動制御装置5₁、・・・、5_nに対応)のブロック図である。

【図4】四脚歩行動物の代表的な歩様の遷移図である。

【図5】提案するリズムジェネレータであるRG 3 1 (図1の目標信号生成装置3に対応)のブロック図である。

【図6】四種類の歩様生成のためのCPGネットワークの構造の一例である。

【図7】本願発明の他の実施例に係る制御システム4 1の概略ブロック図である。

【図8】walkモードにおける各CPGの出力信号x_iとb_iの遷移を示す。

【図9】(a)はtrotモード、(b)はboundモード、(c)はgallopモードにおける各CPGの出力信号x_iの遷移を示す図である。

【図10】walkモードにおけるパラメータAとBを調整させた場合の各CPGの出力信号x_iの遷移を示す図である。

【図11】図4に記載されたwalk、trot、bound、gallopモードより設定された条件と、生物の歩様により得られる拘束に基づき得られる条件を同時に満たす歩様のうち、walk、trot、bound、gallopモード以外の歩様の遷移図である。

【図12】自動的に生成されたc_{i1}及びc_{i2}の組み合わせによる、(a)各CPGの出力信号x_iの遷移及び(b)b_iの遷移を示す。

【図13】本願発明の他の実施例に係る振動制御装置5 1_i (iはn以下の自然数)の概略ブロック図である。

【図14】1500ステップまではRGを用いて位相差制御を行い、1500ステップ以降は外部信号を利用した場合の(a)各CPGの出力信号x_iの遷移及び(b)b_iの遷移を示す。

【図15】1500ステップまではRGを用いて位相差制御を行い、1500ステップ以降は制御信号x₂以外の制御信号x_iの総和がゼロとなるようにb_iを制御した場合の(a)各CPGの出力信号x_iの遷移及び(b)b_iの遷移を示す図である。

【符号の説明】

【0 1 0 1】

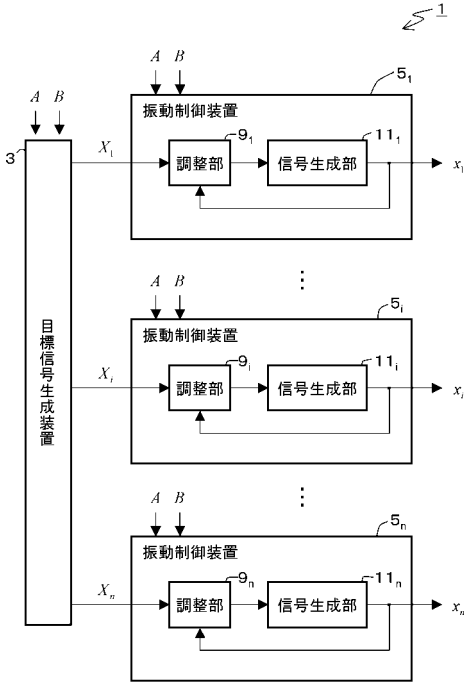
1 制御システム、3 目標信号生成装置、5₁、・・・、5_n 振動制御装置、9₁、
 ・・・、9_n 調整部、1 1₁、・・・、1 1_n 信号生成部、2 1 CPG_i、2 3 調整
 部、2 5 VDP_i、3 1 RG、3 3 VDP_R、4 3 目標信号生成装置、4 7₁、
 ・・・、4 7_n 振動制御装置、5 1_i 振動制御装置、5 3_i 調整部、5 5_i 信号生成部

10

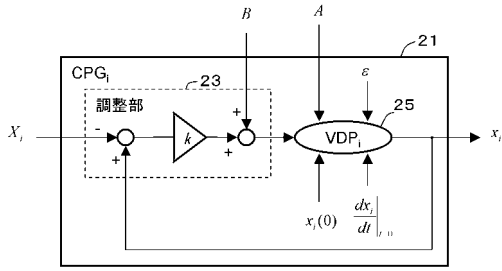
20

30

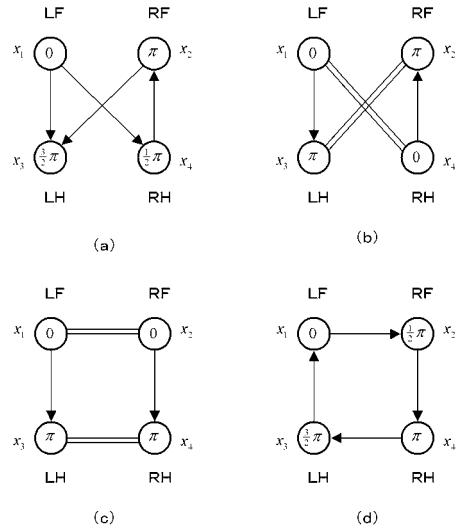
【 図 1 】



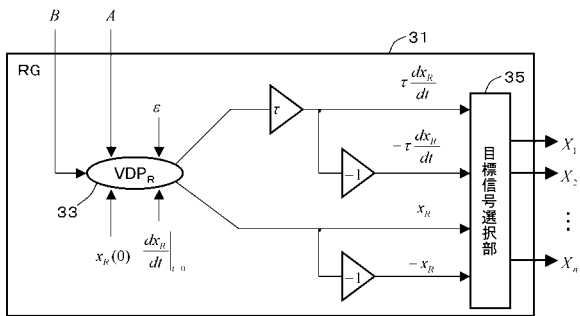
【 図 3 】



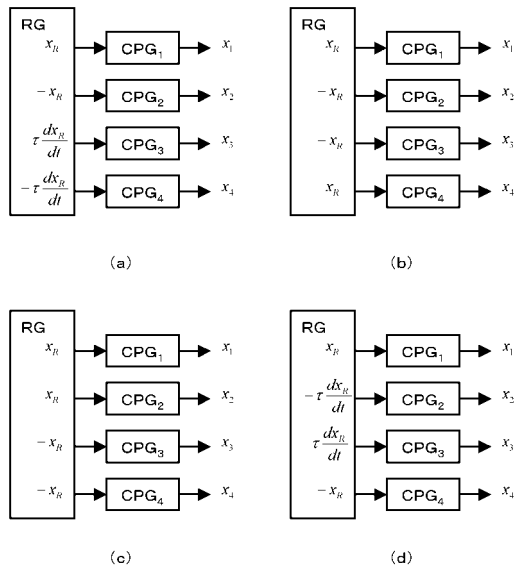
【 図 4 】



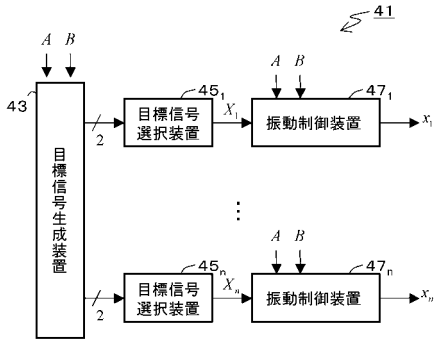
【 図 5 】



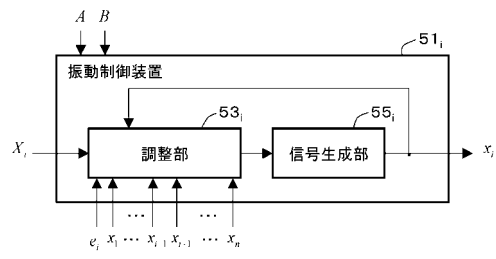
【 図 6 】



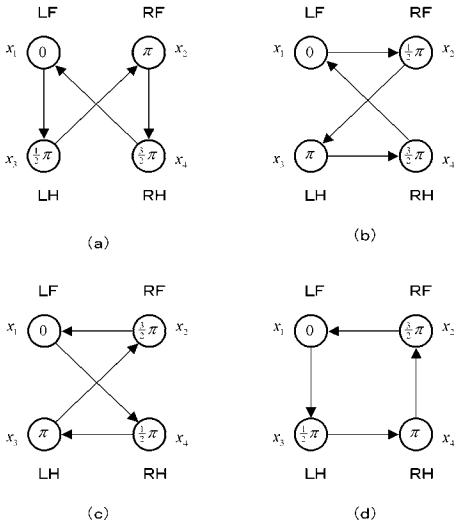
【 図 7 】



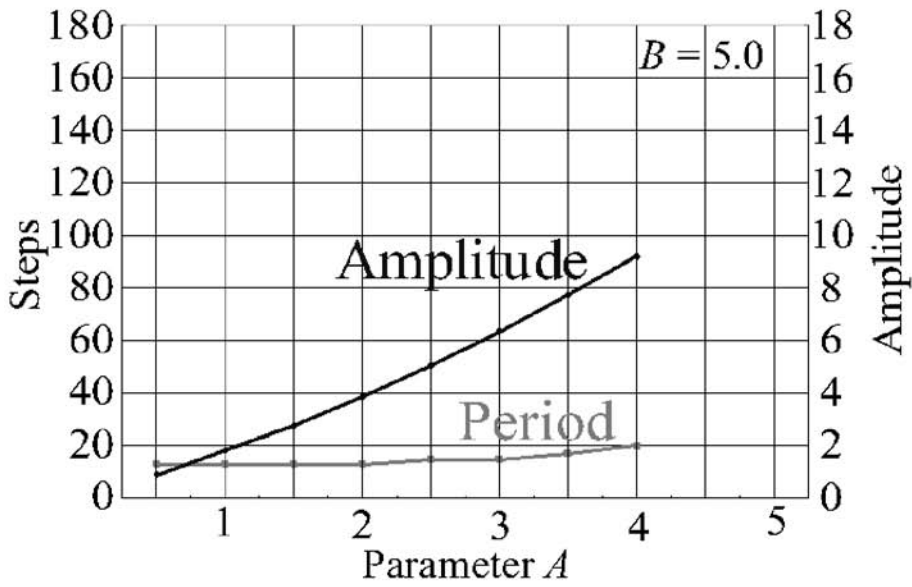
【 図 1 3 】



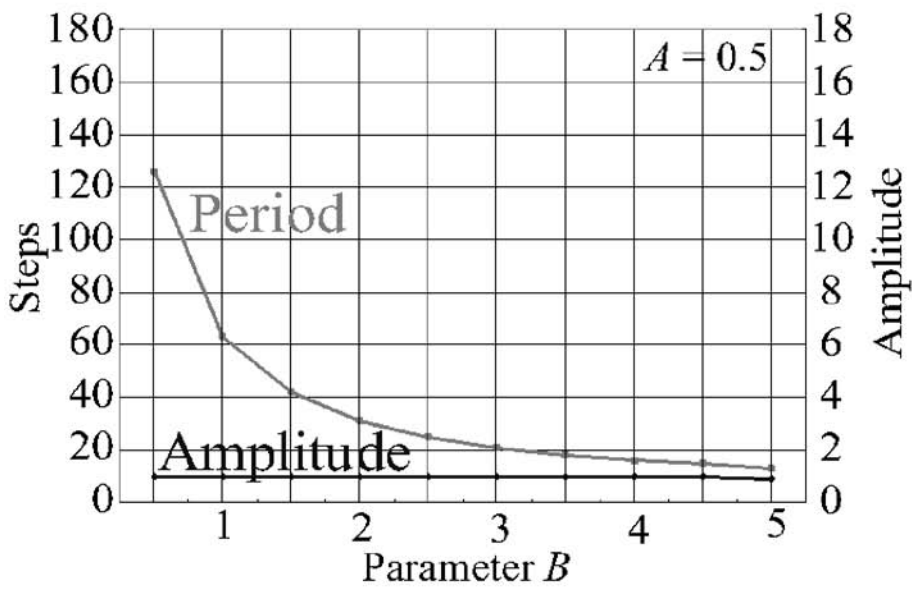
【 図 1 1 】



【 図 2 】

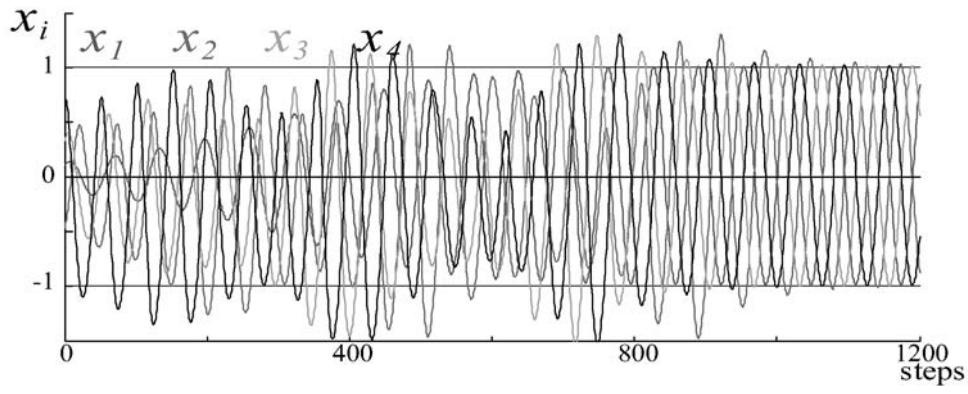


(a)

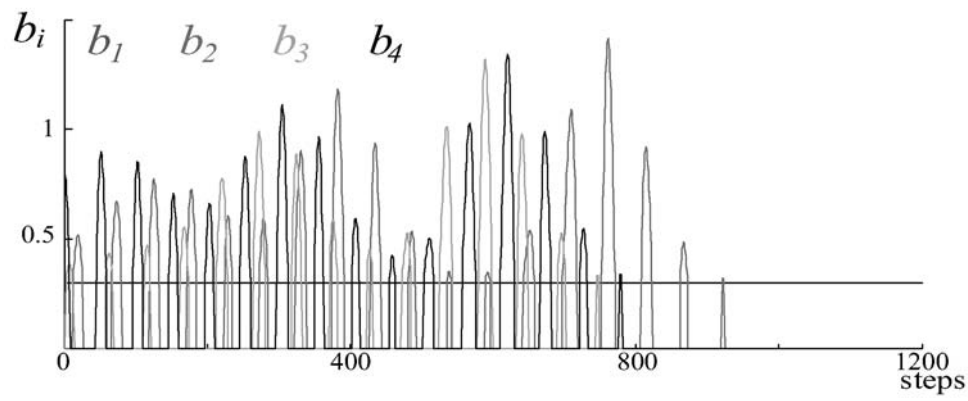


(b)

【 図 8 】

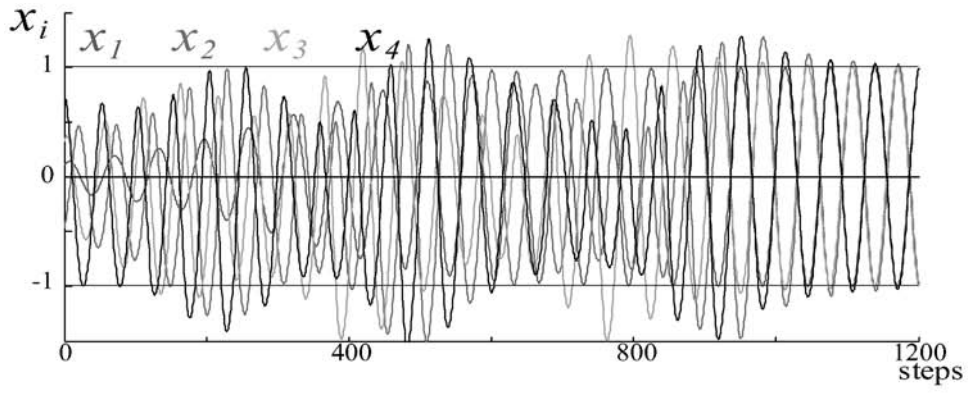


(a)

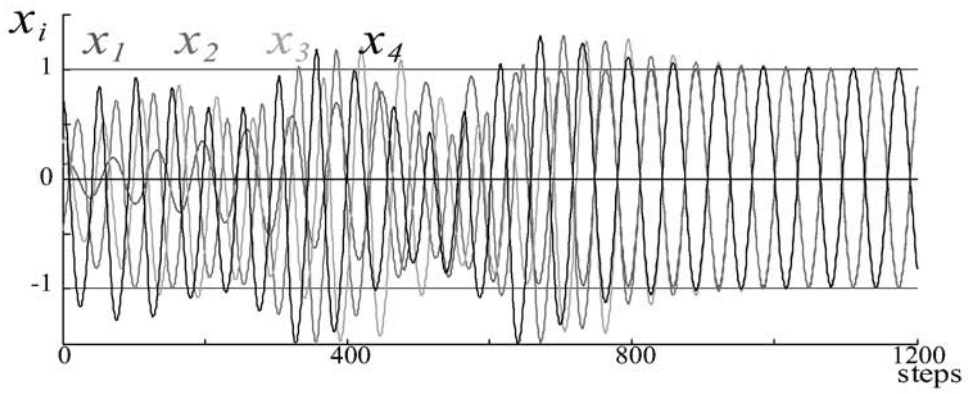


(b)

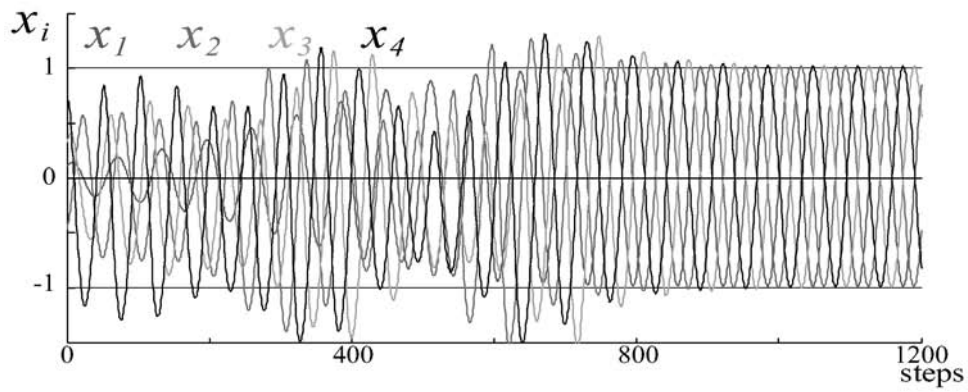
【 図 9 】



(a)

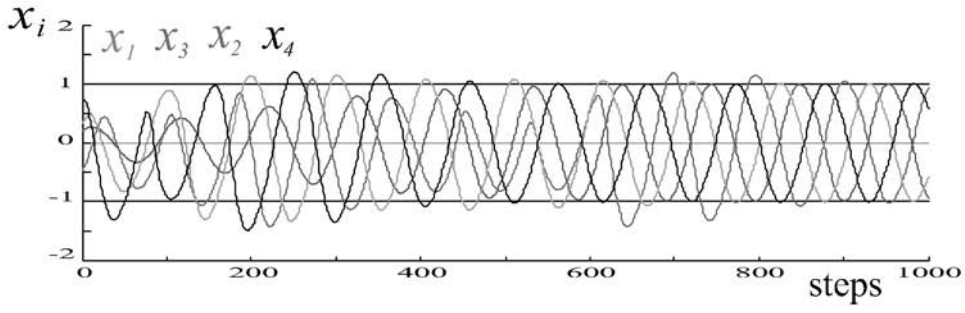


(b)

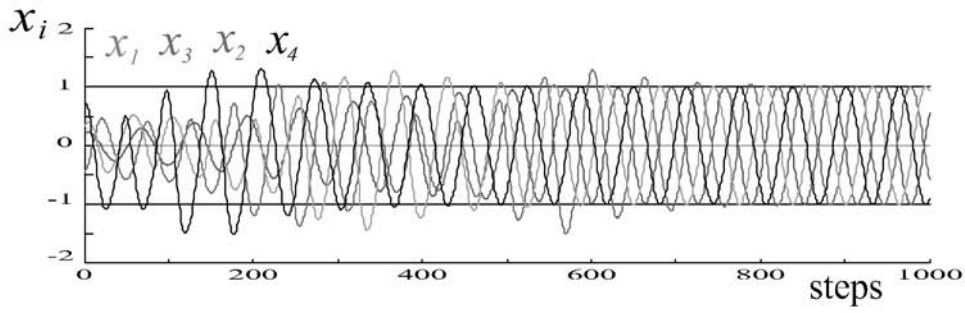


(c)

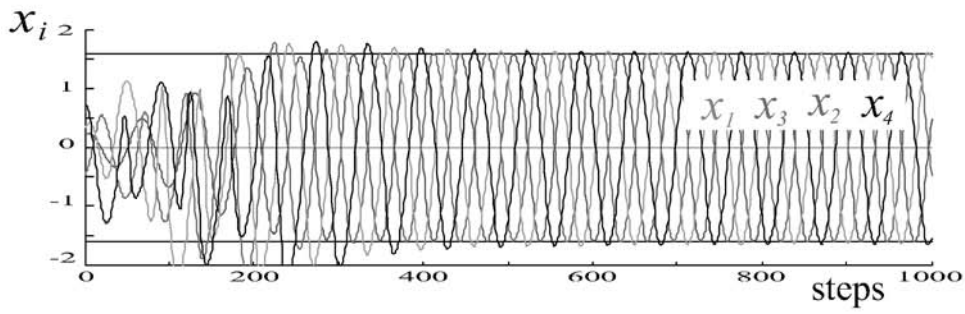
【図 10】



(a)

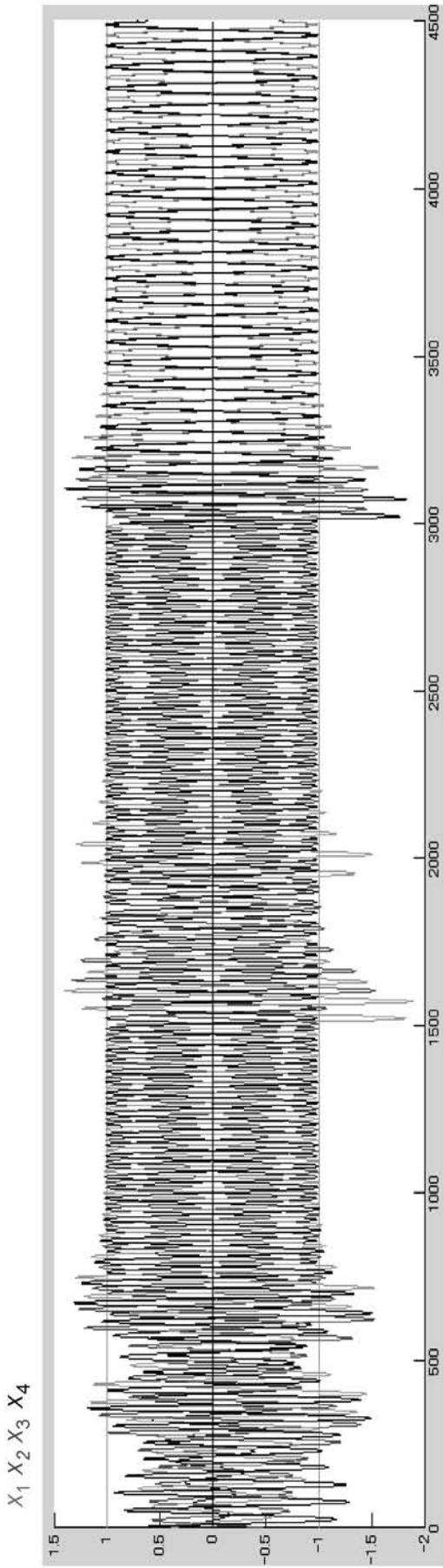


(b)



(c)

【 図 1 2 】

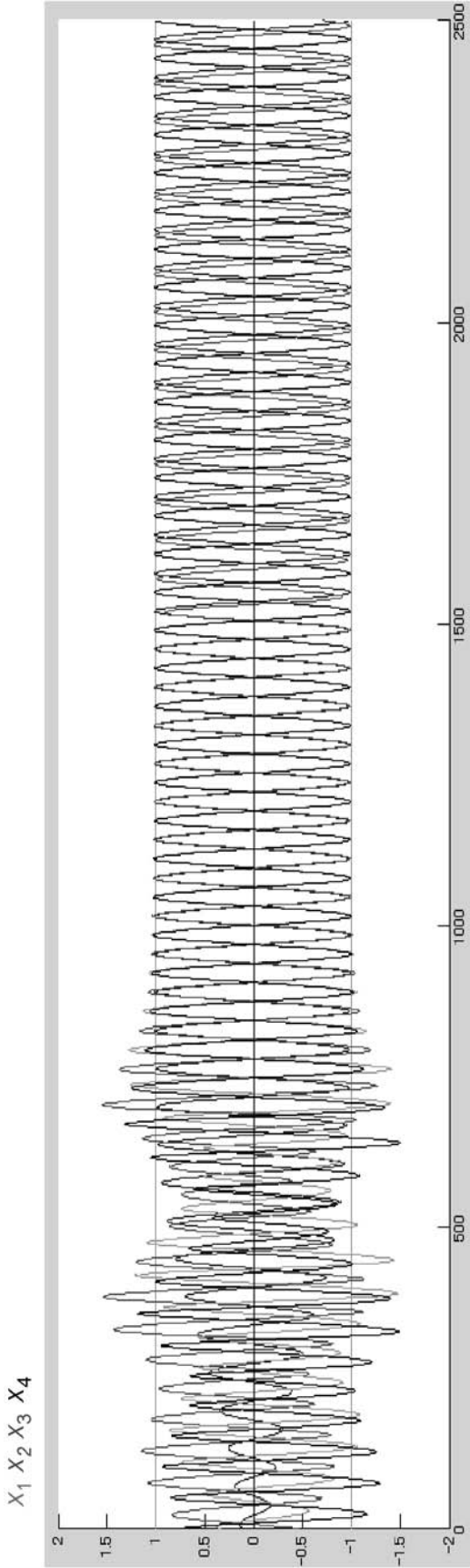


(a)

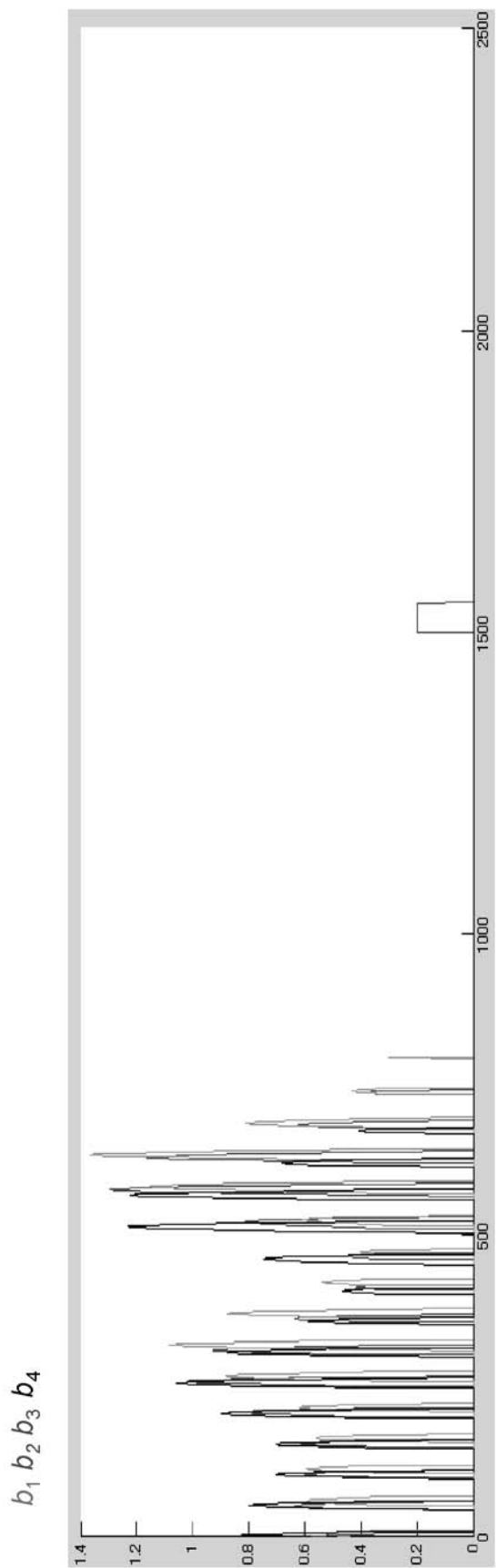


(b)

【 図 1 4 】

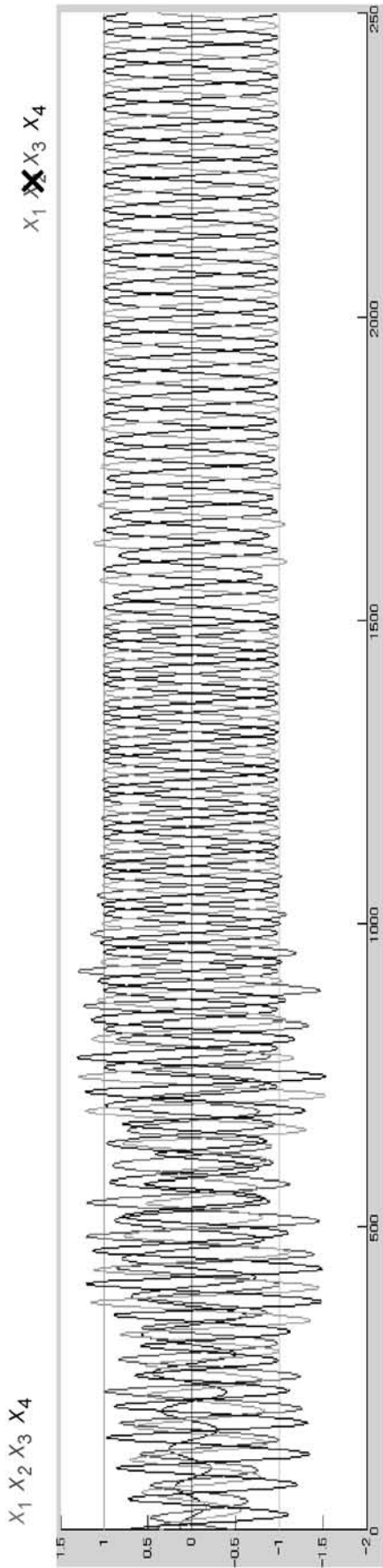


(a)

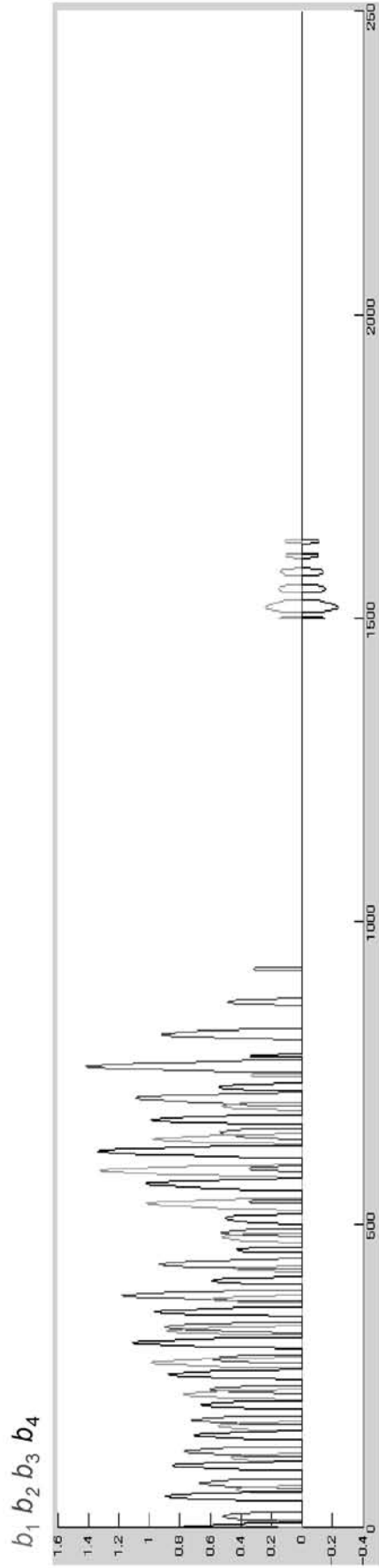


(b)

【 図 1 5 】



(a)



(b)