交互三点支持歩行を生成する数理モデルの構築

-3D ナナフシモデルの開発とその挙動解析-

A construction of a mathematical model expressing an alternating tripod gait

- An application for a 3D stick insect behavior model -

○学 常盤 達司 (九州工業大学大学院), Michael G. Paulin (University of Otago)

山川 烈 (九州工業大学大学院)

Tatsuji TOKIWA, Kyusyu Institute of technology, tokiwa-tatsuji@edu.brain.kyutech.ac.jp

Michael G. Paulin, University of Otago, mike.paulin@stonebow.otago.ac.nz

Takeshi YAMAKAWA, Kyushu Institute of Technology, yamakawa@brain.kyutech.ac.jp

In this paper, we explain the proposed Central Pattern Generator (CPG) network with independent controllability. The network is comprised of some CPGs and one Rhythm Generator (RG). Each CPG and RG is represented by the Van der Pol equation. In order to verify the effectiveness of our proposed CPG network, the network is applied to a generator for an alternating tripod gait, and is implemented to a 3D model of the stick insect. A walking speed by stepping out of the model can be freely controlled by external signals, because the amplitude and the period of each output signal of the CPG can be independently controlled, keeping the value of the phase difference between CPGs.

Key Words: central pattern generator network, stick insects, van der pol equation

1. はじめに

生物の移動運動は、中枢神経系のリズム発生器(Central Pattern Generator network; CPG network)により生成・制御されていると言われている[1]. 本論文では、CPG networkに含まれる複数の非線形振動子を CPG とよび、CPG network と CPG を区別して議論する. 移動運動の多くは、歩様(Gaits)と呼ばれる、数種類の周期的なパターンに分類することができる. 歩様を生成するために、CPG network は自励振動系であり、各 CPG の出力信号の振幅と周期を制御する必要がある. さらに、各脚を協調させるために、CPG 間の位相差制御が不可欠である.

筆者らは、振幅と周期の制御性に優れた CPG network の提案を行っている[2][3]. 本 CPG network は複数の CPG と一つの Rhythm generator (RG) から構成される. 各 CPG と RG は Van der pol (VDP) 方程式を基に設計される. 提案モデルに応用される VDP 方程式は振幅と周期をほぼ独立に制御可能である

という特長を持ち、自励振動系であるので、CPG model として有効であると考えられる. これまでの研究では、本 CPG network を四脚歩行動物の代表的な歩様生成モデルに応用し有効性を確認した[2][3]. 本論文では、提案モデルを用いて、六脚歩行動物(昆虫)の代表的な歩様である交互三点支持歩行の生成・制御を試みた. さらに、実測値を基にナナフシの 3D モデルを作成し、提案モデルを用いて制御される各脚の動きによりナナフシが移動運動を実現可能であることを Matlab シミュレーションにより確認した.

2. Central pattern generator

提案 CPG network は Van der pol (VDP) 方程式を基に設計されている. 本章では、VDP の説明とその特長を利用した CPG network の構造について説明する.

2.1. Van der pol equation

VDP 方程式は、1926 年に Van der Pol により提案された

Figure 1; CPG model

真空管内の振動現象を説明するための数理モデルである[4]. VDP は自励振動系(Limit cycle を持つ)であるので, 移動運動生成モデルとして有用であると考えられる. さらに, 式(1)に示す VDP 方程式は, 出力信号の振幅と周期をパラメータ A と B によって, それぞれほぼ独立に制御可能であるという特長を持つ. 特に, 出力値の安定状態において, 出力信号の振幅値は $2A$ となり, 周期は B に反比例する[5][6].

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

2.2. CPG model

本 CPG モデルは, VDP 方程式の特長である制御性を保持したまま, 各 CPG 間の位相差を制御する機構を有する. 各 CPG の位相を調節するために, パラメータ B を用いて各 CPG の周期を一時的に制御する(Figure 1). CPG network を設計するためには, CPG を必要な個数(n 個)用意する必要がある. ここでは, i 番目($0 < i < n$)の CPG _{i} モデルについて説明する.

まず, CPG _{i} の出力値 x_i の目標信号 X_i が既知であると仮定する. そして, 目標信号 X_i と出力信号 x_i の位相差がゼロになるようにパラメータ B を制御する. 数式で表現すると,

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

$$b_i = k(x_i - X_i) \quad (3)$$

$$B_i = B + b_i \quad (4)$$

となる. パラメータ k は $x_i - X_i$ の差をどれだけ b_i に反映させるかを決定するパラメータであり, 本研究では $k=1$ とした. パラメータ B は各 CPG の自然周波数を表す. 式(3)の計算結果は, 目標信号と出力信号の位相差がゼロになるとゼロになる値である. この条件を満たすために, 目標信号と出力信号の振幅・周期は同じである必要がある. 各 CPG と RG に入力されるパラメータ A と B はそれぞれ同じ値とした. 自励振動系の位相を制御する場合, 一般的には引き込み能力を利用して制御する方法が一般的であるが, 提案モデルは, パラメータ B によって位相を直接制御する.

Figure 2; Rhythm Generator

2.3. Rhythm generator

所望の目標信号を得るために, Figure 2 に示す Rhythm generator (RG) を設計した. RG は VDP 方程式を基に設計される. CPG model で用いられる VDP_i と区別するために, VDP_R と表現する. 目標信号 X_i として, VDP_R で計算される x_R と dx_R/dt を用いる. これは, VDP 方程式が二階の非線形微分方程式で表現されることから可能となる操作である. 目標信号選択装置(Target signal selector)では, $\pm \tau dx_R/dt$, $\pm x_R$ の中から一つの信号が X_i として決定される. この操作は以下の式で表現できる.

$$X_i = c_{i1}x_R + c_{i2}\tau \frac{dx_R}{dt} \quad (5)$$

ここで, パラメータ τ は X_i の単位を x_R の次元に合わせるための時定数である. パラメータ c_{i1} , c_{i2} はそれぞれ 0, -1, 1 のいずれかを取る変数であり, 同時に 0 になることはないものとする. 式(5)により, 位相差 0, π , $\pm \pi/2$ の四種類の目標信号を生成可能となる[2][3].

2.4. CPG network

提案する CPG network モデルは, 複数の CPG と一つの RG によって設計される. 所望の目標信号を選択するためには, まず, 本 CPG network モデルの応用先を決定する必要がある. 本研究では, 交互三点支持歩行の獲得を目指した. なお, 本 CPG network を用いた 4 脚歩行動物の代表的な歩様(walk, trot, bound, gallop mode)信号の生成法は参考文献[2][3]に詳しく説明している.

3. ナナフシ

ナナフシは, さまざまな地域で活動をしている昆虫であり, 日本にも数種類が生息している. ナナフシは敵から身を守るために, 脚を自ら切断し(自割), その脚が脱皮を繰り返すごとに再生されるという興味深い行動をすることで知られている. この特長を有することから, ナナフシは, 生物に学んだ歩様生成機構の解明を目指す研究者に注目されている. 本論文では, 日本に生息しており, 比較的实验に用いることが容易なアマミナナフシを用いて 3D モデルを作成した.

Figure 3; a structure of the CPG network.

Figure 4; output signals of each CPG.

3.1. ナナフシの脚の構造

ナナフシは、6脚の昆虫である。それぞれの脚を本論文では、右前脚(Right-Front;RH), 右中脚(Right-Middle;RM), 右後脚(Right-Rear), 左前脚(Left-Front;LF), 左中脚(Left-Middle;LM), 左後脚(Left-Rear;LR)の略記号を用いて表す。

3.2. 代表的な歩様

ナナフシの代表的な歩様は、常に3つの脚が地面に着地している歩様(交互三点支持歩行)である。つまり、LF, RM, LRとRF, LM, RRがそれぞれ同位相であり、LFとRFは逆位相(位相差 π)である。この歩様を実現するためには、二種類の目標信号(位相差 π)を生成する必要がある。以下、交互三点支持歩行生成のためのCPG networkの設計法を説明する。

3.3. CPG network model for stick insects

位相差が π である2種類の目標信号を6つ用意するため、以下の手順でCPG networkを設計する。

- A) RGを一つと、必要な数のCPGを用意する。本研究では、六脚の昆虫であるナナフシのための移動運動を生成するモデルを設計するので、CPGを6個用意した。

- B) 振幅と周期を決定するパラメータAとBをそれぞれ各CPGとRGに入力する。
- C) 各CPGを各脚に対応させる。本論文では、CPG₁, CPG₂, CPG₃, CPG₄, CPG₅, CPG₆,をそれぞれRF, RM, RR, LF, LM, LRに対応させる。
- D) 各CPGの目標信号 X_i を所望の位相差をもとに決定する。本論文では、LFを基準として、RMとLRは同位相に、RF, LM, RRは逆位相に制御する。
- E) LF, RM, LRに対応する各CPGであるCPG₄, CPG₂, CPG₆,の信号を生成するための目標信号 X_4 , X_2 , X_6 として x_R を入力する。
- F) CPG₁, CPG₅, CPG₃の出力信号を生成するための目標信号 X_1 , X_5 , X_3 は、LFの目標信号 X_4 と比べて位相差が π であるので、 $-x_R$ とする。

上述の手順を基に設計されたCPG networkモデルをFigure 3に示す。

4. シミュレーション結果

本章では、Figure 3に示したCPG networkモデルのシミュレーション結果を示す。二次の非線形微分方程式は、4次のルンゲクッタ法を用い、Matlabにて計算を行った。さらに、各CPGの出力信号を用いてナナフシの3Dモデルを制御したので報告する。

4.1. CPG network

本論文で設計されたCPG networkモデルのシミュレーション結果をFigure 4に示す。 $\epsilon=0.2$, $k=1$ とし、初期値として $x_R=0.4$, $dx_R/dt=0.5$, $x_L=0.1$, $x_2=-0.5$, $x_3=0.3$, $x_4=-0.2$, $x_5=-0.4$, $x_6=0.7$, $dx_L/dt=0.2$, $dx_2/dt=0.3$, $dx_3/dt=-0.3$, $dx_4/dt=-0.2$, $dx_5/dt=0.3$, $dx_6/dt=-0.1$,を用いた。さらに、 $A=0.5$, $B=1$ とした。シミュレーション条件によつては、各CPGの位相差制御後も式(3)の b_i がゼロにならない場合があるので、 $b_i=0.3$ 以下は0として処理した。シミュレーション結果より、各CPGの出力波形の振幅値は $2A$ で落ち着いていることがわかる(図中の実線は $x=2A$ の値を表す)。さらに、安定状態における各CPGの出力波形は、二種類の波形が生成されており、それらは、位相差が π であることが確認できる。よって、所望の出力信号が生成・制御されていることがわかる。各CPGはVDP方程式を基に設計されているので、

自励振動系であり、さらに、パラメータ A と B を変化させた場合、出力信号の振幅・周期をほぼ独立に制御可能であるという特長を保持している。

4.2. 3D model of stick insects

Figure 4 の出力信号を用いて、3D ナナフシモデルの各脚を制御した。Figure 5 に本研究で作成した 3D ナナフシモデルを示す。モデルを簡略化するため、4 つの節(coxa, femur, tibia, tarsus)からなる脚を設計した。各脚の長さは、アマミナナフシ(幼虫)の実測値を基に設計した。Table 1 に各脚の長さを示す。なお、左右対称であるので、左脚の長さのみ表示する。頭部、胸部、腹部の長さは、それぞれ 3(mm)、24(mm)、25(mm)とした。

3D モデルは Matlab を用いて設計した。各部位は、胸部を基準に Denavit-Hartenberg 表記されており、回転許容範囲が設定されている。各関節には、非線形な弾性特性を持つ非線形弾性特性機構が設けられており、必要に応じて非線形バネ係数、剛性、ダンパ係数を調節することが可能である。重力は 9.8[N]とし、凹凸のない平面環境上でのシミュレーションを行った。

Figure 4 に示す各 CPG の出力信号を用いて各脚の coxa を制御した。具体的には、鉛直方向上向きを正として左右に回転させた。Femur と Tarsus は回転させず、進行方向を回転軸として Tibia を必要に応じて回転させた。Tibia の回転範囲は本モデルでは固定の値を用いた。

講演会では、本論文で紹介した 3D モデルのシミュレーションの動画を紹介し、使用した各パラメータの詳細、挙動

Table 1; configuration parameters [mm]

	coxa	femur	Tibia	Tarsus
LF	2	15	15	5
LM	2	10	10	5
LR	2	12	12	5

Figure 5; designed stick insects 3-D model.

について報告する。

5. おわりに

本論文では、制御性に優れた CPG network の説明を行い、提案モデルをナナフシの基本的な歩様信号(交互三点支持歩行)生成のための移動運動生成モデルに応用した。ナナフシ 3D モデルの実験結果から、提案モデルは、六脚歩行動物のための基本的な歩様を生成・制御可能であることを確認した。今後の課題として、以下の三つが挙げられる。1. 各 CPG 間の相互作用に関する考察。2. 外部環境の変化を CPG network にフィードバックする機構の考察。3. 最適なエネルギー関数を設定し、エネルギーを最小にする歩様の自律的獲得機構の考察である。

謝辞

本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「生物とロボットの織り成す脳情報工学の世界(九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻)」および、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 A, 14205038)の援助の下で行われた。

文献

- [1]F. Delcomyn, "Neural basis of rhythmic behavior in animals," Science, j Vol.210, pp.492-498, 1980.
- [2]Tatsuji Tokiwa and Takeshi Yamakawa, "Central Pattern Generator network model with independent controllability," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP' 08), pp.156-159, 2008.
- [3]常盤達司, 山川 烈, "制御性に優れた Central Pattern Generator Network の提案, " 第 21 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2008.
- [4]Van der pol, On relazation oscillations, Phil. Mag., No.2, pp.987-993, 1926.
- [5]Louis A. Pipes and Lawerence R. Harvill, Mathematics for engineers and physicists, McGrawHill Education, Third Edition, 1970.
- [6]Tatsuji Tokiwa and Takeshi Yamakawa, "Modified Van der pol Oscillators for Hardware Design," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP' 07), pp.595-598, 2007.