

# 生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路

## - センサフィードバックに対する周波数/振幅変調特性 -

中田 一紀<sup>†</sup> 浅井 哲也<sup>†</sup> 雨宮 好仁<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 北海道大学工学部電子工学科

〒 060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

E-mail: †{nakada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 本研究では、ロボティクスにおける「生物規範型の移動運動の制御」を行うアナログ CMOS 回路の提案を行う。近年、生物の移動運動の制御機構である CPG (Central Pattern Generator) をロボティクスに対して応用する研究が数多く進められてきた。本研究では、小型歩行ロボットの運動制御、特にリズム協調運動の制御を目的とした CPG のアナログ集積回路化を行った。また、アナログ回路の非線形性を生かすために、Wilson-Cowan 神経振動子に基づく CPG モデルを構成し、その回路化を行った。さらに、CPG 回路に基づくフィードバック制御系を構成し、その動作特性について確認した。SPICE によるシミュレーションの結果、安定した複数の振動パターンの生成とその振動パターンの周波数/振幅変調特性について確認した。

キーワード アナログ CMOS 回路, CPG, 結合神経振動子, 移動運動, センサフィードバック.

## An Analog CMOS Circuit for Bio-Inspired Locomotion Controller

### - Frequency and Amplitude Modulation by Sensory Feedback -

Kauzki NAKADA<sup>†</sup>, Tetsuya ASAI<sup>†</sup>, and Yoshihito AMEMIYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan.

E-mail: †{nakada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

**Abstract** In this report, we propose an analog CMOS circuit that controls rhythmic movements of locomotion in robotics. In recent years, many researchers have applied the control principles of locomotion in animals, known as the central pattern generator (CPG), to movement control in robotics. We designed an analog CMOS circuit that controls locomotory movement in micro walking robots, especially, rhythmic coordination. In order to make use of the nonlinearity of analog circuit efficiently, our circuit is based on a CPG model that consist of the Wilson-Cowan neural oscillators. Furthermore, we constructed a feedback control system based on the CPG circuit, and confirmed the operation properties of the system. By using computer simulator SPICE, it was shown that our control system has the capability to generate stable rhythmic patterns and the frequency and amplitude of these rhythmic patterns are modulated by the sensory feedback.

**Key words** Analog CMOS circuit, CPG, Coupled neural oscillators, Locomotion, Sensory feedback .

## 1. はじめに

生物の歩行や遊泳、飛翔などの移動運動は、CPG (Central Pattern Generator) とよばれる中枢神経系が生成する自律的かつ周期的なリズム運動を基本としている。このリズム運動により制御対象である物理系 (身体) の協調が行われ、柔軟かつ安定した運動が実現される [1]。また、CPG は感覚情報の入力を通じて、身体および環境と相互作用することにより、環境の変動に対する高い適応性を示す [2]。

近年、このような CPG の振る舞いをロボティクスにおける移動運動の制御に対して応用する研究が数多く進められてきた [5]-[12]。多賀は、松岡によって提案された神経振動子 [5] に、筋骨格系との相互作用を取り入れ、歩行運動を制御する CPG のモデルを提案した [6]。木村らは、そのモデルを拡張し、さらに反射機構を組み込むことで、四脚型ロボットの動歩行制御を行っている [7]。また、A. Biilard と A. Ijspeert は、CPG に対する感覚入力を変化させることで、複数の振動パターンを生成し、四脚型ロボットにおける歩行運動を制御している [8]。このような CPG による運動制御の利点としては、次のようなものが挙げられる：(1) CPG の生成するリズム運動により物理系の協調が行われ、制御変数の実効的な自由度を低減する。(2) その結果、単位時間当たりの計算量を削減することができる。(3) 感覚情報をフィードバックとして入力することで、外乱などの環境の変動に対する高い適応性を実現することができる。

本研究では、以上の利点に基づいて、ロボティクスにおける生物規範型の移動運動の制御、特にリズム協調運動を制御する CPG の回路化を行う。従来の研究は、デジタルプロセッサにおける逐次処理を行うものがほとんどであり、実時間処理に伴う計算量やシステムの消費面積の点で問題が少なくない。本研究では、それらの問題点を解決するために、アナログ CMOS 回路として CPG 回路を構成した。また、アナログ回路の非線形特性を生かすために、Wilson-Cowan 神経振動子に基づく CPG モデルを構成し、その回路化を行った。さらに、CPG 回路を簡単な制御系に組み込み、その振る舞いについて調べた。CPG により実際に運動を制御する場合、センサ情報が重要な役割を果たす。そこで、CPG 回路にセンサフィードバックを与え、その動作特性について調べた。

## 2. CPG による移動運動の制御

生物の移動運動における CPG の役割のひとつは、各肢の運動の生成および制御である。各関節を制御する神経振動子が相互作用することにより、基本的な運動パターンが生成される。また、もうひとつの役割は、各肢間の協調運動の制御である。各肢を制御する CPG が相互結合することによりネットワークを構成し、その生成する振動パターンが協調運動を制御している。特に多脚動物において、このような各肢間の協調は、安定した移動運動を実現するうえで不可欠である。脊椎動物、たとえば馬では、状況に応じて複数の歩行パターンを選択することができる。これは、CPG の実質的な回路構造が神経修飾物質

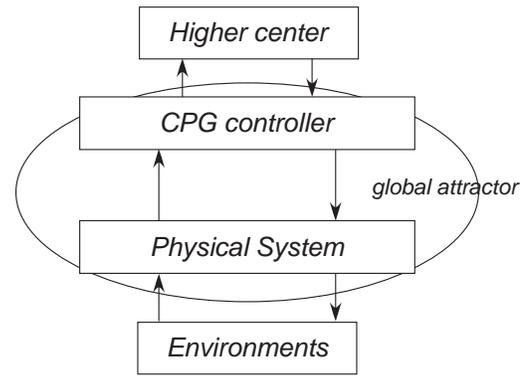


図 1 The concept of the global entrainment.

の作用により変化することによって行われていると考えられている。実際、ヤツメウナギにおいて神経修飾物質の働きにより CPG の実質的な回路構造が変化し、複数の遊泳パターンが生成されることが確認されている [2]。脊椎動物における代表的な歩行パターンとしては、walk, bound, gallop などが知られている。これらの歩行パターンを歩容という。歩容を特徴付けるのは、各肢間の相対位相差である。CPG は、この相対位相差を制御することで各肢間の協調運動を実現している。

さらに、この CPG によるリズム協調運動は、感覚器からの入力により修飾を受ける。たとえば、遊泳するサメにおいて感覚入力に応じて、その遊泳運動の振動周波数や振幅が変化することが知られている [2]。多賀によれば、この感覚入力による CPG の修飾はリズム協調運動において本質的なものである。感覚入力を介して、CPG と制御対象である物理系が相互作用した結果、系全体として安定なリミットサイクル (グローバルアトラクタ) を生じ、外乱などの環境の変動に対して適応的な運動を実現する [6]。図 1 に、その概念図を示す。

## 3. CPG モデル

本研究では、CPG のモデルとして結合神経振動子を考える。また、特にリズム協調運動の制御を目的とした CPG モデルについて提案する。

### 3.1 神経振動子モデル

CPG を構成する神経振動子のモデルとして、Wilson-Cowan 神経振動子モデル [3] を考える。このモデルは、興奮性-抑制性ニューロン対 (図 2 (a)) のひとつであり、そのダイナミクスは、次の微分方程式:

$$\tau_u \dot{u} = -u + f_\mu(Au - Cv + S_u) \quad (1)$$

$$\tau_v \dot{v} = -v + f_\mu(Bu - Dv + S_v) \quad (2)$$

に従う。ここで、 $u, v$  はそれぞれ興奮性および抑制性神経細胞の平均膜電位であり、 $A, B, C$  および  $D$  は結合係数、 $S_u, S_v$  は外部入力、 $\tau_u, \tau_v$  は時定数を表す。また、 $f_\mu(x) = \tanh(x)$  であり、 $\mu$  はその制御パラメータを表す。このモデルは、結合係数、外部入力および制御パラメータの値に応じて、たとえばリミットサイクルなどの、さまざまな挙動を示す。

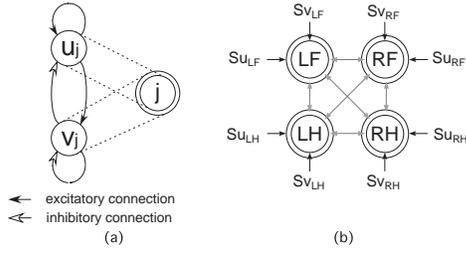


図 2 The coupled Wilson-Cowan neural oscillators.

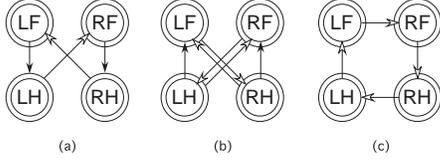


図 3 The schematics of the Wilson-Cowan CPG model. (a) Walk mode. (b) Bound mode. (c) Gallop mode.

### 3.2 ネットワークモデル

この Wilson-Cowan 神経振動子を相互結合することにより、リズム協調運動を制御する CPG を構成する。このとき、そのダイナミクスは次式:

$$\tau_u \dot{u}_i = -u_i + f_\mu \left( \sum_j A_{ij} u_j - \sum_j C_{ij} v_j + S_{u_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_v \dot{v}_i = -v_i + f_\mu \left( \sum_j B_{ij} u_j - \sum_j D_{ij} v_j + S_{v_i} \right) \quad (4)$$

に従う。ここで、添え字は各関節を制御する神経振動子を表し、 $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$  および  $D_{ij}$  は結合係数、 $S_{u_i}$ ,  $S_{v_i}$  は外部入力をそれぞれ表す。図 2 (b) に、ネットワークの基本構成を示す。ここで、2 重丸は各関節を制御する神経振動子を表す。また、LF, RF, LH, RH は左前肢、右前肢、左後肢および右後肢をそれぞれ表わす。

このネットワークはその結合構造、すなわち振動子間の結合係数に応じて、複数の歩行パターンに対応した振動パターンを生成する。図 3 に、脊椎動物の代表的な歩行パターンである walk, bound, gallop のそれぞれに対応した振動パターンを生成する場合について示す。

### 4. 回路構成

ここで、CPG モデルのアナログ CMOS 回路化について説明する。

はじめに、CPG 回路を構成する基本回路について説明する。基本回路は、差動対、カレントミラー、RC 回路および定電流源により構成した (図 4 (a))。ただし、入力電圧の重み付加算を行うために、差動対の入力部には、フローティングゲート MOS FETs [17] を用いた。また、集積回路上で高抵抗を実現するために、スイッチトキャパシタ回路 [16] を用いた。これにより、回路の動作時の消費電流も抑えられる。

この基本回路の動作は次式:

$$C_i \dot{V}_i = -\frac{V_i - V_{SS}}{R_i} + I_\mu(V_{dif}) \quad (5)$$

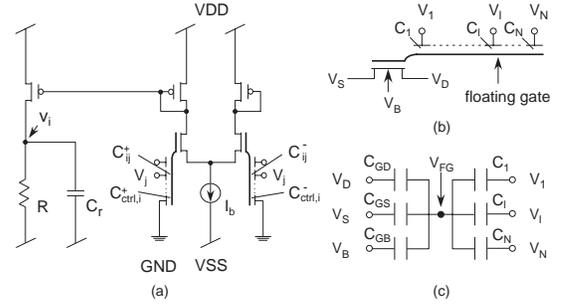


図 4 The schematic of the cell circuit.

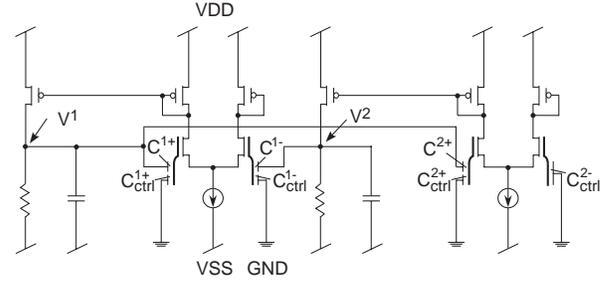


図 5 The schematic of the oscillator circuit.

に従う。ここで、 $V_i$  は電圧、 $C_i$  は容量、 $R_i$  は抵抗の値をそれぞれ表す。また、 $I_\mu(\cdot)$  は差動対の出力電流を表し、式 (1) の非線形特性を近似する。特に、差動対を構成する MOS FET がサブスレッショルド領域で動作する場合、その入出力特性は次式 [15]:

$$I_\mu(V_{dif}) = I_b \frac{1 + \tanh(\mu V_{dif})}{2} \quad (6)$$

に従う。ここで、 $\mu = \kappa/2V_T$  であり、 $V_T$  は thermal voltage、 $\kappa$  はプロセスに依存する物理パラメータをそれぞれ表す。また、 $I_b$  は差動対のバイアス電流、 $V_{dif}$  は差動対の差動入力部、すなわちフローティングゲート部の電位差を表す。ここで、各入力ゲートの電位を  $V_j (j = 1, \dots, n)$ 、フローティングゲートと各入力ゲートの結合容量を  $C_j$ 、フローティングゲートと各端子間の容量を  $C_{GD}$ ,  $C_{GB}$ ,  $C_{GS}$  としたとき、フローティングゲートの電位  $V_{FG}$  は次式:

$$V_{FG} = \frac{C_{GD}}{C_T} V_D + \frac{C_{GS}}{C_T} V_S + \frac{C_{GB}}{C_T} V_B + \sum_l \frac{C_l}{C_T} V_l \quad (7)$$

に従う。ただし、 $C_T = C_{GD} + C_{GS} + C_{GB} + \sum_j C_j$  であり、初期電荷を 0 とした。これにより、差動対の差動入力部の電位差は次式:

$$V_{dif} \simeq \sum_j \frac{C_{ij}^+}{C_T} V_j^+ - \sum_j \frac{C_{ij}^-}{C_T} V_j^- \quad (8)$$

となる。ここで、 $V_j^\pm$  は各入力電圧、 $C_{ij}^\pm (i, j = 1, \dots, n)$  は各結合容量をそれぞれ表す。以上により、 $I_b/2 + V_{SS}/R_i = 0$  としたとき、基本回路の動作式は次式:

$$C_i \dot{V}_i \simeq -\frac{V_i}{R_i} + \frac{I_b}{2} F_\mu \left( \sum_j C_{ij}^+ V_j^+ - \sum_j C_{ij}^- V_j^- \right) \quad (9)$$

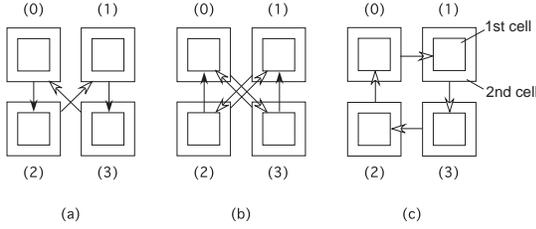


図 6 The schematics of the network circuit. (a) Walk mode. (b) Bound mode. (c) Gallop mode.

に従う。ここで、 $F_\mu(x) = \tanh(\mu x/C_T)$  とした。

この基本回路を、興奮性および抑制性細胞と見立て、相互に結合することで、式(1)に対応した神経振動子回路を構成する(図5)。このとき、結合は容量結合により容易に実現することができる。また、回路の動作式は次式:

$$C_i \dot{V}_i^1 = -\frac{V_i^1}{R_i} + \frac{I_b}{2} F_\mu(C_i^{1+} V_i^1 - C_i^{1-} V_i^2 + Q_i^1) \quad (10)$$

$$C_i \dot{V}_i^2 = -\frac{V_i^2}{R_j} + \frac{I_b}{2} F_\mu(C_i^{2+} V_i^1 - C_i^{2-} V_i^2 + Q_i^2) \quad (11)$$

に従う。ここで、 $V_i^1, V_i^2$  はそれぞれ興奮性および抑制性細胞の膜電位に相当する。また、 $Q_i^1, Q_i^2$  は外部入力を表す。この回路は、式(1)のモデルと同様、結合係数、外部入力および制御パラメータの値に応じて、さまざまな挙動を示す。

さらに、神経振動子回路を相互に結合し、ネットワーク回路を構成する。このとき、ネットワーク回路の動作式は次式:

$$C_i \dot{V}_i^1 = -\frac{V_i^1}{R_i} + \frac{I_b}{2} F_\mu \left( \sum_j C_{ij}^{1+} V_j^1 - \sum_j C_{ij}^{1-} V_j^2 \right) \quad (12)$$

$$C_i \dot{V}_i^2 = -\frac{V_i^2}{R_j} + \frac{I_b}{2} F_\mu \left( \sum_j C_{ij}^{2+} V_j^1 - \sum_j C_{ij}^{2-} V_j^2 \right) \quad (13)$$

に従う。この回路は、図6の結合構造に応じて結合容量を定めることにより、複数の歩行パターンに対応した振動パターンを生成することができる。

## 5. 制御系の構成

歩行ロボットのリズム協調運動を制御するために、CPG回路を組み込んだ制御系を構成する(図7)。制御対象として、歩行ロボットの腰関節を駆動するアクチュエータを仮定し、その運動方程式は次式:

$$M_i \ddot{\theta}_i + c_i \dot{\theta}_i + k_i \theta_i = \tau_i(t) \quad (14)$$

に従うものとする。ここで、 $M_i$  は慣性モーメント、 $c_i$  は粘性係数、 $k_i$  は弾性係数、 $\theta_i$  は関節角をそれぞれ表す。また、 $\tau_i(t)$  はトルクを表す。各関節を駆動するアクチュエータにトルクを与えることで、その角度制御を行う。ここでは、CPGの出力

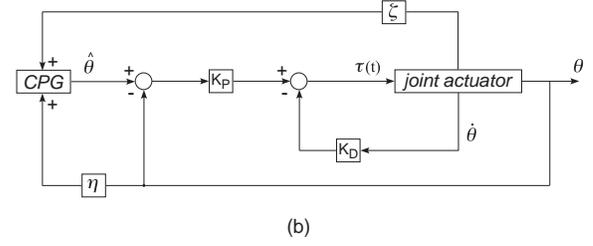
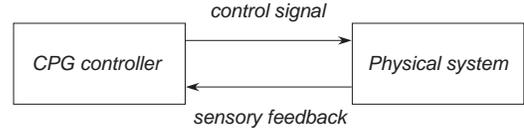


図 7 The block diagrams of the control system.

を目標角とする比例微分制御を行う。つまり関節トルクを次式:

$$\tau_i(t) = K_P(\hat{\theta}_i - \theta_i) - K_D \dot{\theta}_i \quad (15)$$

によって与える。ここで、 $\hat{\theta}$  は目標角を表す。また、 $K_P, K_D$  は比例ゲインおよび微分ゲインをそれぞれ表す。この制御対象および制御器は2次遅れ要素により構成され、その伝達関数は次式:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

により表される。ここで、 $\zeta$  は制動係数、 $\omega_n$  は固有角周波数であり、次式:

$$\zeta = \frac{(K_D + c_i)}{2\sqrt{M_i(K_P + k_i)}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_P + k_i}{M_i}} \quad (17)$$

によってそれぞれ表される。この制御対象および制御器に対して、CPGの出力  $V_i^1$  によって目標角を  $\hat{\theta}_i = gV_i^1$  として与える。また、各関節の角度をセンサ情報として、CPGに与えることによりフィードバック制御を行う。この結果、系全体として安定な振動パターンを生成し、外部環境の変動に対して適応的にリズム協調運動を制御することができる。

## 6. シミュレーション結果

SPICEによる回路シミュレーションにより、CPG回路の動作特性を確認した。以下では、MOSIS AMIS 1.5- $\mu\text{m}$  CMOS technology BSIM LEVEL 49 デバイスパラメータ、HSPICEによるシミュレーションを行った。また、共通のパラメータとして、電源電圧を  $V_{DD}=1.5\text{ V}$ ,  $V_{SS}=-1.5\text{ V}$ , 容量および抵抗値をそれぞれ  $C_i=20\text{ nF}$ ,  $R_i=10\text{ M}\Omega$  とした。

### 6.1 CPG回路の基本動作

はじめに、CPG回路を構成する神経振動子回路の基本動作について確認した。ここで、振動子回路の各結合係数比は次のように設定した:

$$C_i^{1+} : C_i^{1-} : C_i^{2+} = 5.5 : 5.5 : 3.5$$

ただし、 $C_T = 1.0\text{ pF}$  とした。また、制御対象および制御器の

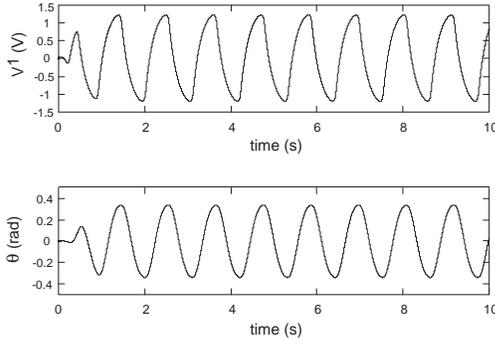


図 8 The waveforms of the control system.

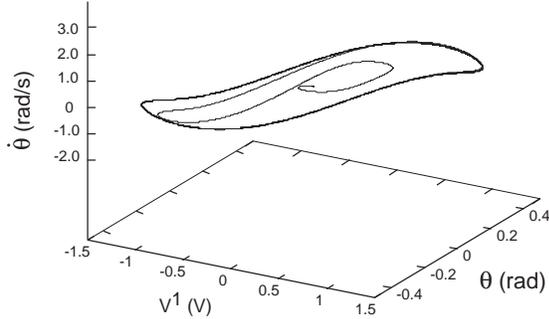


図 9 The phase-plane portrait of the control system.

パラメータを制動係数  $\zeta < 1$ 、固有角周波数  $\omega_n >$  振動子回路の固有角周波数とするために、次のように設定した:

$$M = 1.0, \quad K_P + k = 100.0, \quad K_D + c = 10.0$$

このとき、 $\zeta = 0.5$ 、 $\omega_n = 10.0$  となる。さらに、振動子回路に対するセンサフィードバックとして:

$$S_u = \theta, \quad S_v = 0 \quad (18)$$

を与えた。図 8 に、 $K_{Pg}=0.25$  として目標角を与えたときの振動子回路の出力および関節角の時間応答を示す。また、図 9 に相空間における軌道を示す。これらの結果により、安定したりミットサイクルを描くことが確認できる。

次に、ネットワーク回路の動作特性について調べた。図 6 に従って、回路の結合容量を定め、歩行パターンに対応する複数の振動パターンの生成を確認した。まず、共通のパラメータとして、結合容量比を次のように定めた:

$$C_{i,i}^{1+} : C_{i,i}^{1-} : C_{i,i}^{2+} = 5.5 : 5.5 : 3.5$$

ただし、 $C_T = 1.0$  pF とした。また、制御対象および制御器のパラメータも振動子回路単体と同様に設定した。

図 10 (a) に、walk に対応する振動パターンについて示す。このとき、回路の結合容量は次のように設定した:

$$C_{0,2}^{1+} = C_{1,3}^{1+} = C_{2,1}^{1-} = C_{3,0}^{1-} = 0.2 \text{ pF}$$

図 10 (b) に、bound に対応する振動パターンについて示す。このとき、回路の結合容量は次のように設定した:

$$C_{0,3}^{1-} = C_{1,2}^{1-} = C_{2,1}^{1-} = C_{3,0}^{1-} = 0.1 \text{ pF}$$

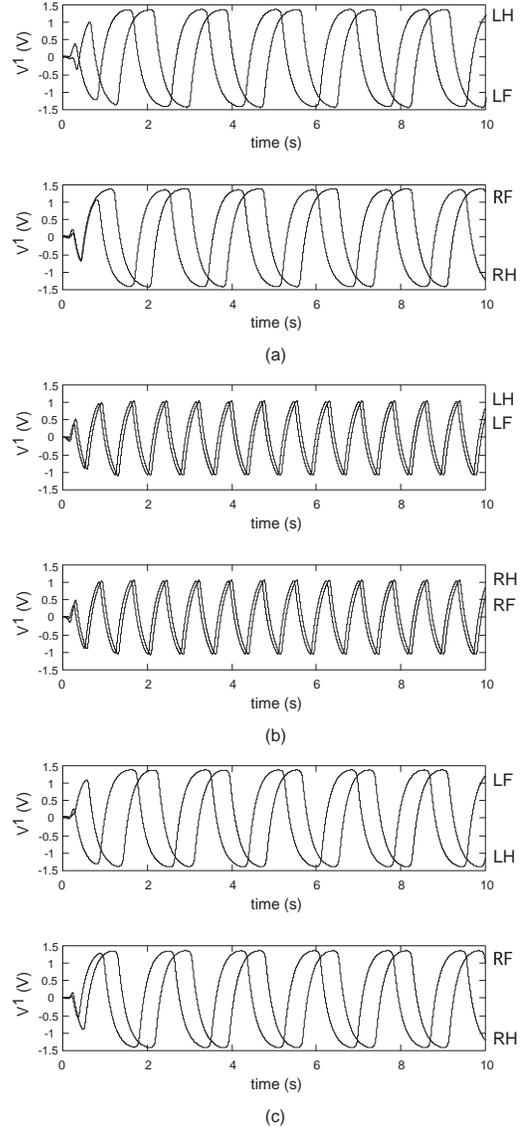


図 10 The waveforms of the control system. (a) Walk mode. (b) Bound mode. (c) Gallop mode.

$$C_{0,2}^{1+} = C_{1,3}^{1+} = 0.2 \text{ pF}$$

図 10 (c) に、gallop に対応する振動パターンについて示す。このとき、回路の結合容量は次のように設定した:

$$C_{0,2}^{1-} = C_{1,0}^{1-} = C_{2,3}^{1-} = C_{3,1}^{1-} = 0.2 \text{ pF}$$

以上により、系全体として歩行パターンに対応した安定した振動パターンの生成を確認した。

## 6.2 センサフィードバックに対する変調特性

ここでは、CPG 回路のセンサフィードバックに対する変調特性について示す。はじめに、振動子回路の変調特性について調べた。図 11 に、フィードバックゲインを変化させたときの振幅および振動周波数について示す。正のフィードバックにより振動周波数が減少し、負のフィードバックにより振動周波数が増加することが分かる。また、それに対して振幅はそれほど大きく変化しない。これは、振幅の増加が回路の電源電圧により一定範囲に抑えられるためである。

同様に、ネットワーク回路の周波数/振幅変調特性について

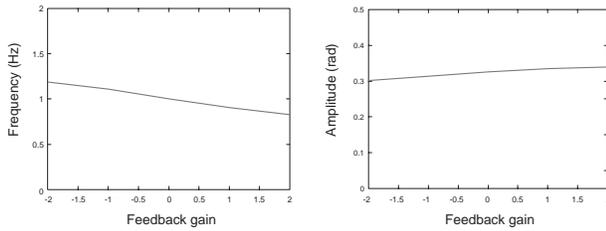


図 11 The frequency and amplitude modulation by the sensory feedback. (the oscillatory circuit.)

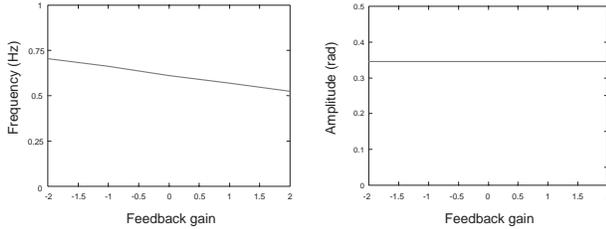


図 12 The frequency and amplitude modulation by the sensory feedback (the network circuit).

調べた。いずれの歩行パターンにおいても、振動子回路単体と同様の特性を示すことが確認できた。図 12 に、walk mode の場合について示す。ただし、負のフィードバックを大きくかけると、その振幅が大きく減少したり、減衰振動する場合も存在する。これは、フィードバックにより系の安定性が変化するためであり、系が不安定にならないように、各パラメータを設定する必要がある。そして、そのためには制御系全体のシステムダイナミクスによる安定性解析を行い、系が不安定にならないパラメータを求める必要がある。

以上、CPG 回路に基づくフィードバック制御系の動作特性について調べた。その結果、フィードバックをかけることにより系全体として安定した複数の振動パターンを生成すること、フィードバックゲインを変化させることによりその振動周波数が変化することを確認した。

## 7. まとめ

本研究では、生物規範型の移動運動の制御、特にリズム協調運動を制御する CPG のアナログ CMOS 回路について提案した。提案した CPG 回路は、アナログ回路の非線形性を生かすために、Wilson-Cowan 神経振動子に基づき構成した。回路はその結合構造に応じて、歩行パターンに対応した複数の振動パターンを生成することができる。また、CPG 回路に基づくフィードバック制御系を構成し、その動作特性について調べた。その結果、系全体として安定なリミットサイクルを描くことを確認した。これは、制御対象に外乱が加わっても、CPG 回路が適応的にその出力を変化させることを示す。また、フィードバックゲインに応じて、振幅を大きく変化させることなく振動周波数を変化させられることを確認した。このことを利用すれば、回路の物理パラメータを一定としたままで、振動周波数を

外部から制御することが可能になる。以上の性質は、歩行運動を制御する CPG 回路に適したものであり、提案回路の有用性を示す。今後の研究として、試作チップを実際の制御系に組み込み、その動作を確認したうえで、小型歩行ロボットに実装することを考えている。

## 文 献

- [1] F. Delcomyn, "Neural basis of rhythmic behavior in animals," *Science*, vol. 210, pp. 492-498, 1980.
- [2] F. Delcomyn, *Foundations of Neurobiology*, New York: W, H. Freeman and Co., 1997.
- [3] H. R. Wilson and J. D. Cowan, "Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons," *Biophysical Journal.*, vol. 12, pp. 1-24, 1972.
- [4] G. Brown, "On the nature of the fundamental activity of the nervous centers: together with an analysis of the conditioning of the rhythmic activity in progression, and a theory of the evolution of function in the nervous system," *J. Physiol.*, vol. 48, pp. 18-46, 1914.
- [5] K. Matsuoka, "Mechanism of frequency and pattern control in the neural rhythm generators," *Biological Cybernetics*, vol. 56, pp. 345-353, 1987.
- [6] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics*, vol. 65, pp.147-159, 1991.
- [7] H. Kimura, Y. Fukuoka and K. Konaga, "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot by using neural system model", *ADVANCED ROBOTICS*, Vol. 15, No. 8 , pp.859-876, 2001.
- [8] A. Billard and A. J. Ijspeert, "Biologically inspired neural controllers for motor control in a quadruped walking robot", in *IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks*, Italy, July, 2000.
- [9] M. Williamson, "Neural control of rhythmic arm movements", *Neural Networks*, vol. 11, No. 7-8, pp. 1379-1394, 1998.
- [10] P. Arena, L. Fortuna, M. Branciforte, "Reaction-Diffusion CNN algorithms to generate and control artificial locomotion", *IEEE Trans. on Circuits and Syst-I*, Vol. 46, No. 2, pp. 253-260, 1999.
- [11] P. Arena, "Realization of a Reaction-Diffusion CNN algorithms for locomotion control in an hexapod robot", *The Journal of VLSI signal processing*, Vol. 23, No. 2, pp. 267-280, 1999.
- [12] M. A. Lewis, M. J. Harttmann, R. Etienne-Cummings, A. H. Cohen, "Control of a robot leg with an adaptive aVLSI CPG chip," *Neurocomputing*, vol. 38-40, pp. 1409-1421, 2001.
- [13] H. Nagashino, Y. Nomura and Y. Kinouchi, "Generation and transitions of phase-locked oscillations in coupled neural oscillators", in *the fourteenth SICE Annual Conference*, Nagoya, Japan, 2001.
- [14] C. A. Mead, *Analog VLSI and neural systems*, Addison-Wesley, Reading, 1989.
- [15] M. Isami and T. Fiez, Eds. *Analog VLSI: Signal and Information Processing*, McGraw-Hill, 1993.
- [16] R. J. Barker, H. W. Li, D. E. Boyce, *CMOS circuit design, layout, and simulation*, IEEE Press, 1998.
- [17] T. Shibata, T. Ohmi, "A functional MOS transistor featuring gate level weighted sum and threshold operations," *IEEE, Trans. on Electron Devices*, vol. 39, no. 6, pp. 1444-1445, 1990.
- [18] B. A. Minch, C. Diorio, P. Hasler, and C. A. Mead, "Translinear circuits using subthreshold floating-gate MOS transistors," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 9, no. 2, pp. 167-179, 1998.