

# 歩行運動を制御する結合神経振動子系の集積回路化

## - 弱反転領域で動作する電流モード結合神経振動子回路 -

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、生物における歩行運動の制御機構を模擬する集積回路について提案する。生物の歩行運動は、CPG(Central Pattern Generator) とよばれる中枢神経系によって生成/制御される。近年、このCPGを自律型歩行ロボットの制御に応用した研究が進展している。しかし、従来の研究の多くはデジタルプロセッサによる逐次処理を行うものであり、実時間処理に伴う計算負荷が大きい。そこで本研究では、並列処理が可能である集積回路によるCPGの実装について提案する。CPGのモデルとして松岡によって提案された神経振動子に若干の修正を加えたものをもとに結合神経振動子系を構成し、それを弱反転領域で動作する電流モードアナログCPG回路として設計した。SPICEによる回路シミュレーションにより、CPG回路が位同期した発振パターンを生成し、その発振周波数や振幅をバイアス電流を調整することによって広範囲に制御できることを示す。

キーワード アナログCMOS回路、弱反転領域動作、電流モード回路、CPG、結合神経振動子

## Analog CMOS Implementation of Coupled Neural Oscillators for Developing a Robot Locomotion Controller

### - An Analog Current-Mode CMOS Circuit for Coupled Neural Oscillators Operating in Subthreshold Region -

Kazuki 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, Hokkaido, 060-8628 JAPAN  
E-mail: †{nakada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

**Abstract** We propose an analog integrated circuit that mimics a biological mechanism in locomotion control of animals. Locomotion of animals, such as walking and running, is generated and controlled by the central nervous system called as the central pattern generator (CPG). Recently, the CPG framework have been utilized to develop locomotion controllers for autonomous walking robots. However, these controllers have mostly been implemented with digital processors that can only process sequentially, and thus the computational load of such controllers are large in real-time execution. Hence, we propose integrated circuit implementation of a CPG controller that allows parallel computation essentially. We constructed a CPG model as coupled neural oscillators based on the neural oscillator model proposed by Matsuoka, and implemented it as an analog current-mode CPG circuit that operates in the subthreshold region. By using SPICE, it is shown that the CPG circuit generates phase-locked oscillations and the amplitude and frequency of the oscillation can be controlled by tuning bias currents over a wide range.

**Key words** Analog CMOS circuit, Current-mode operation, CPG, Coupled neural oscillators, Locomotion

## 1. ま え が き

生物の歩行運動は、CPG (Central Pattern Generator) とよばれる、脊髄や神経節に存在する比較的下位の中樞神経系が生成するリズム運動を基本として行われる [1]。CPG は、上位中枢からの司令入力により誘発されると、周期的な神経活動を生じる。また、感覚神経からのフィードバックによる修飾を受けて、その発振周波数や位相差を変化させ、周囲の状況の変化に対する高い適応性を示す [2]。さらに、発振パターンそのものを多様に変化させることもできる。

近年、このような CPG の振る舞いをロボティクスにおける歩行運動の制御に応用した研究が進展している [5]- [10]。多賀は、松岡によって提案された神経振動子 [3] に、筋骨格系との相互作用を取り入れ、二足歩行運動の制御を行う CPG モデルを構成した [5]。木村らは、そのモデルをもとに反射機構を組み込んだ CPG モデルを構成し、4足歩行ロボットの動歩行制御に応用している [8]。このような CPG による歩行制御の利点として、次の点が挙げられる：(1) CPG が生成するリズム運動により制御対象である物理系の協調が行われ、制御変数の実効的自由度が低減される。(2) その結果、単位時間当たりの計算量が減少し、実時間動作を実現できる。(3) 環境の変動に対する高い適応性が得られる。

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歩行運動の制御を目的とした CPG の集積回路化について提案する。従来の研究は、デジタルプロセッサによる逐次処理を行うものが多く、実時間処理に伴う計算負荷などの問題がある。そこで本研究では、並列処理が可能であるアナログ集積回路による CPG の実装について提案する。CPG のアナログ集積回路化について、これまでいくつかの研究が行われている [9]- [12]。それらに共通する問題点として、回路の制御性の向上が挙げられる。つまり、電子的に制御可能な回路であることが望ましい。本研究では、CPG のモデルとして松岡によって提案された神経振動子 [3] に若干の修正を加えたものをもとに結合神経振動子系を構成し、弱反転領域で動作する電流モードアナログ CPG 回路を設計した。松岡によって提案された神経振動子モデルは、発振周波数や振幅の制御性が高いため、さまざまなロボットの運動制御にこれまで応用されてきた [5]- [8]。本研究では、その制御性の高さを生かすために、電流モードアナログ回路として CPG 回路を設計した。SPICE シミュレーションにより、CPG 回路が歩行運動の制御に適した、位相同期した発振パターンを生成し、その発振周波数や振幅をバイアス電流を調節することにより広範囲に制御可能であることを示す。

## 2. CPG モデル

ここで、本研究で回路化する CPG モデルについて説明する。

### 2.1 神経振動子モデル

はじめに、CPG モデルを構成する神経振動子モデルについて説明する。これまで CPG モデルとしてさまざまなものが提案されている [13]- [15]。Brown は CPG の構成要素として Half-center oscillator model を提案した [13]。図 1 に示される

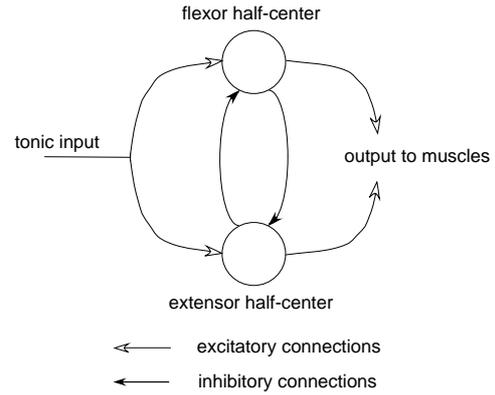


図 1 Half-center oscillator model .

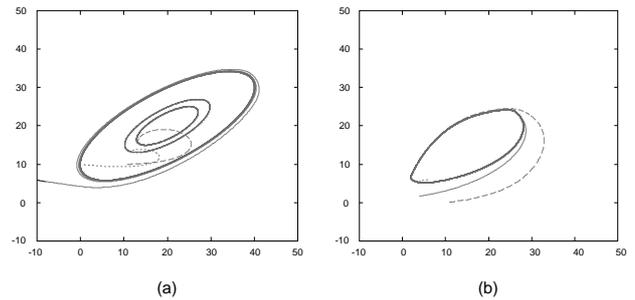


図 2 神経振動子モデルの相空間上の軌道 .

ように、このモデルは 2 つの神経細胞が相互抑制されており、持続的入力に応じてそれぞれの神経細胞が関節を駆動する屈筋と伸筋を交互に興奮させる。松岡は、次式で表される神経振動子モデルによって Half-center oscillator model を構成した [3]：

$$\tau_u \frac{du_i}{dt} = -u_i + s - \beta v_i - w f(u_i) \quad (1)$$

$$\tau_v \frac{dv_i}{dt} = -v_i + f(u_i) \quad (2)$$

ここで、 $u_i, v_i$  はそれぞれ神経細胞の内部状態および疲労度を表す状態変数、 $\tau_{u_i}, \tau_{v_i}$  は時定数、 $s$  は外部からの持続入力、 $\beta$  は疲労係数および  $w$  は結合係数を表している。また、 $f$  は次式：

$$f(x) = \max(0, x) \quad (3)$$

で与えられる非線形関数である。

このモデルは神経振動子として次のような利点がある：(1) 入力  $s_i$  に比例して振幅が変化するため、振幅の制御が容易である。(2) 入力周期の場合、神経振動子は入力に引き込まれる。(3) 時定数  $\tau_{u_i}, \tau_{v_i}$  を変化させることにより、発振周波数を制御できる。以上の利点から、このモデルはロボティクスにおけるさまざまな運動制御に応用されてきた [5]- [10]。多賀は、このモデルに筋骨格系との相互作用を取り入れた CPG モデルを構成した [5]。多賀は、センサフィードバックを介して環境と CPG が相互に引き込まれる結果として、適応的な歩行運動が実現することをシミュレーションにより示した [5]。Williamson は、ロボットの腕の周期的運動を生成する CPG モデルを構成し、CPG の発振周波数とロボットの腕の固有周波数がセンサフィードバックを介して同調することを示した [6]。琴坂らは、

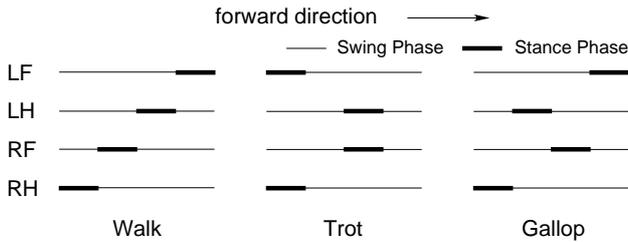


図3 脊椎動物の代表的歩行パターン．

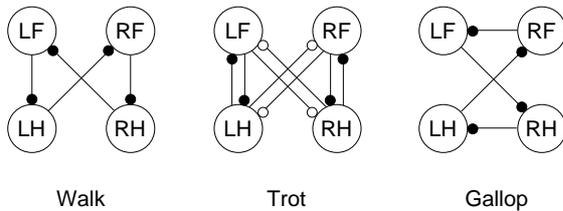


図4 CPG ネットワークモデルの構成．

同様にロボットの腕の運動を生成する CPG モデルを構成し、人間の動作に同期したロボットの動作生成に応用した [7]。木村らは、反射機構を組み込んだ CPG モデルを構成し、4 足歩行ロボットの不整地における動歩行制御に応用している [8]。これらの研究では、いずれもセンサフィードバックが重要な役割を果たしており、それは神経振動子に対する入力として与えられるので、特に上記の (1), (2) は重要な利点である。

本研究では、このモデルの利点を生かすために、電流モードアナログ集積回路として回路化する。ただし、上記のモデルをそのまま回路化するのはではなく、次のように修正を加えたものを回路化する：

$$\tau_u \frac{du_i}{dt} = -u_i + f(s - \beta v_i - w_{ij} u_j) \quad (4)$$

$$\tau_v \frac{dv_i}{dt} = -v_i + f(u_i) \quad (5)$$

ここで、 $u_i$ 、 $v_i$  はそれぞれ興奮性および抑制性神経細胞の状態変数、 $\beta$  および  $w$  は結合係数と見なすことができる。

電流モードアナログ集積回路において、状態変数や相互作用を電流によって表現する必要があるため、それらはできるだけ一方向電流で表現できることが望ましい。つまり、状態変数の定義域および値域が、正あるいは負のいずれかの領域であると良い。松岡によって提案された神経振動子をそのような領域で動作するようにすると、いくつかの問題を生じる。たとえば、座標変換によって状態変数の定義域および値域を変更すると、制御できる振幅の範囲が狭くなる。つまり、振幅がある範囲を越えると状態変数が正から負あるいは負から正になり、一方向電流で表現することができない。また、パラメータの選び方によっては、初期条件に応じた複数の周期解を持つ多重安定性を示す (図 2)。これに対して、修正したモデルでは振幅の範囲の制限も多重安定性も示さない、パラメータ領域が存在する。また、このモデルには松岡によって提案されたモデルと同様の利点を持つ。よって、本研究ではこのモデルを CPG モデルの構成要素として考える。

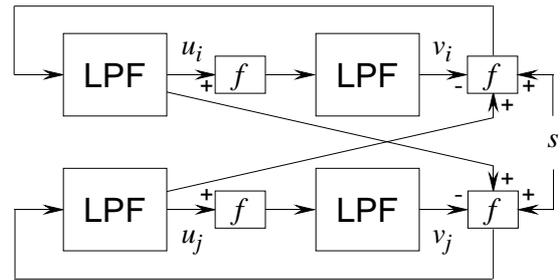


図5 神経振動子モデルのブロックダイアグラム

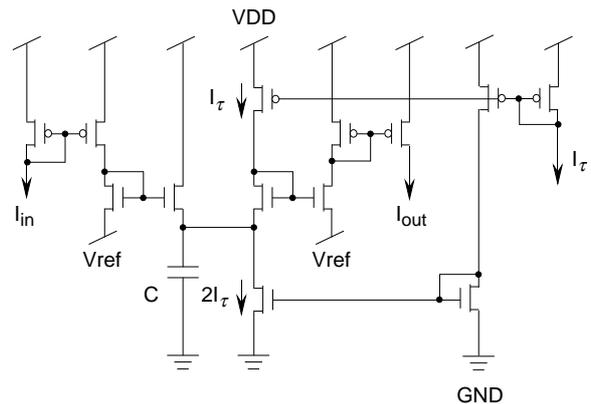


図6 電流モードローパスフィルタ

## 2.2 CPG ネットワークモデル

前述の神経振動子を構成要素とし、歩行運動を生成する CPG モデルを構成する。脊椎動物、たとえば馬は Walk, Trot および Gallop といった複数の歩行パターンを示す。図 3 に示すように、これらの歩行パターンは位相同期した脚の振り子運動と見なすことができる。ここで、LF, LH, RF および RH は左前脚、左後脚、右前脚および右後脚をそれぞれ表している。また、細線は遊脚相、太線は支持脚相を表している。複数の神経振動子を相互に結合し、脊椎動物の代表的な歩行パターンに対応した、位相同期した発振パターンを生成する CPG ネットワークを構成する。図 4 に、その結合構造を示す。ここで、黒丸および白丸はそれぞれ抑制性および興奮性の結合を表している。

## 3. 回路構成

ここで、前述した CPG モデルの集積回路化について説明する。

### 3.1 神経振動子回路

CPG モデルを構成する神経振動子モデルの回路化について説明する。図 5 に、神経振動子モデルのブロックダイアグラムを示す。ここで、LPF はローパスフィルタ、 $f$  は非線形関数をそれぞれ表している。この神経振動子モデルの制御性の高さを生かすために、電流モードアナログ集積回路として神経振動子回路を構成する。図 6 は、弱反転領域で動作する電流モードのローパスフィルタである [16]-[17]。この回路の動作は次式：

$$\tau \frac{dI_{out}}{dt} = -I_{out} + I_{in} \quad (6)$$

に従う。ここで、 $I_{in}$  は入力電流、 $I_{out}$  は出力電流、 $\tau$  は時定数

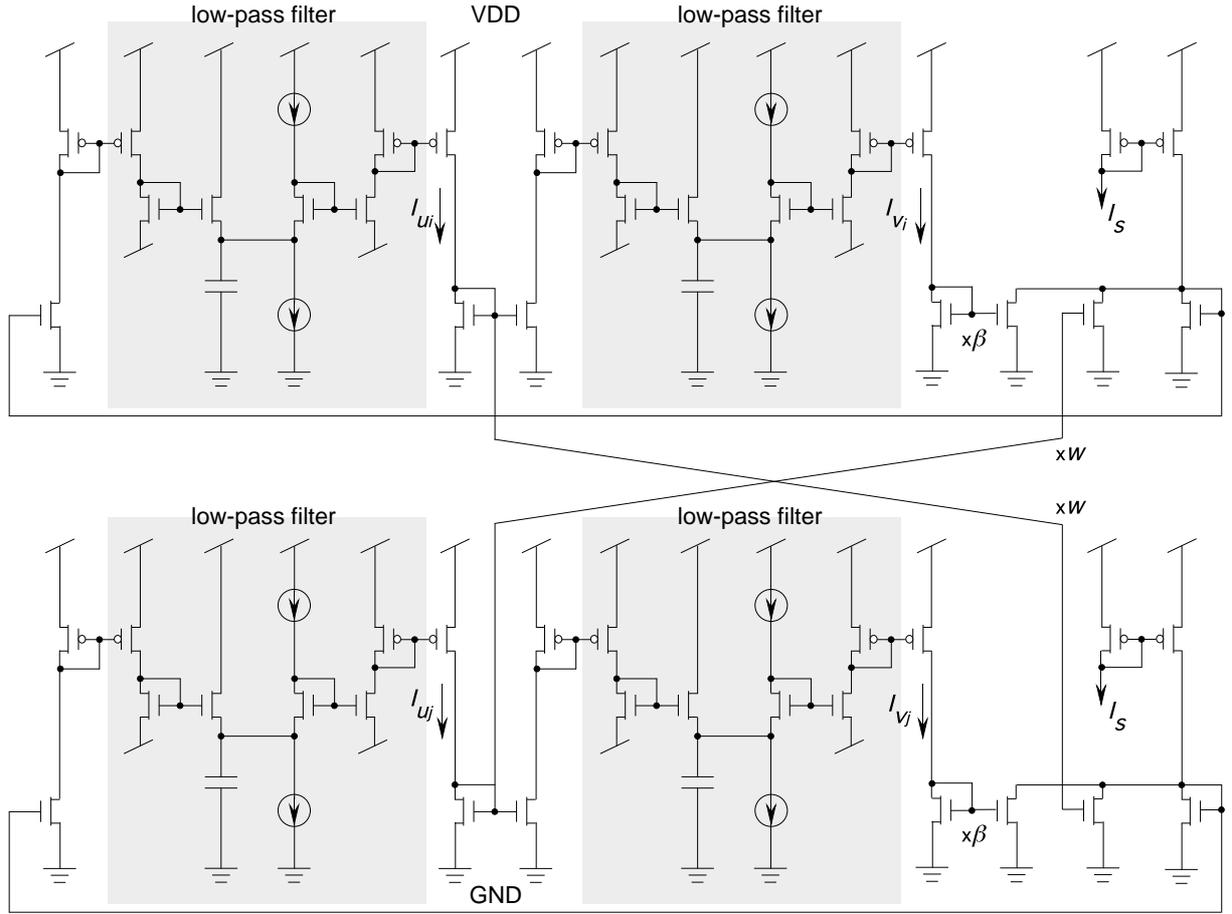


図7 神経振動子回路 .

であり、次式：

$$\tau = \frac{CU_T}{I_T} \quad (7)$$

で与えられる．ここで、 $C$  は容量、 $U_T$  は thermal voltage、 $I_T$  はバイアス電流である．この回路は、バイアス電流を調節することによって、時定数を制御することができる．また、非線形関数  $f$  は、カレントミラーにより容易に回路化できる．図5で示したブロックダイアグラムに従って、神経振動子回路を構成した（図7）．ここで、回路の結合重みは、カレントミラーを構成するトランジスタのサイズ比によって決まる．この回路の動作は次式；

$$\tau \frac{dI_{u_i}}{dt} = -I_{u_i} + f(I_s - \beta I_{v_i} - w I_{u_j}) \quad (8)$$

$$\tau \frac{dI_{v_i}}{dt} = -I_{v_i} + f(I_{u_i}) \quad (9)$$

に従う．ここで、 $I_{u_i}$ 、 $I_{v_i}$  はそれぞれ興奮性および抑制性神経細胞の状態変数に対応した電流、 $I_s$  はバイアス電流、 $\beta$  および  $w$  は結合係数を表している．この回路は、バイアス電流  $I_s$  の大きさに比例して  $I_{u_i}$ 、 $I_{v_i}$  の動作範囲が変化する．つまり、 $I_s$  によって  $I_{u_i}$ 、 $I_{v_i}$  の振幅を制御することができる．また、この回路の発振周波数は  $I_T$  により広範囲に制御することができる．さらに、この回路は弱反転領域で動作するため、低消費電力が期待できる．

### 3.2 CPG ネットワーク回路

神経振動子回路を組み合わせて、CPG ネットワーク回路を構成する．図4に示した結合構造に従って、CPG 回路を構成する．図8に、そのブロックダイアグラムを示す．ここで、黒および灰色の矢印は、それぞれ抑制性および興奮性結合を表し、カレントミラーにより回路化した．この回路は、その結合構造に応じて複数の位相同期した発振パターンを生成する．

## 4. 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、神経振動子回路および CPG ネットワーク回路の動作特性を確認した．以下、HSPICE、MOSIS AMIS LEVEL 49 1.5- $\mu\text{m}$  CMOS デバイスパラメータによるシミュレーション結果について示す．

はじめに、神経振動子回路の動作特性について示す．図9に、神経振動子回路の出力電流  $I_{u_i}$  および  $I_{v_i}$  の時間変化を示す．ここで、電源電圧  $VDD = 1.5 \text{ V}$ 、 $V_{rf} = 0.5 \text{ V}$ 、 $C = 10 \text{ nF}$ 、 $I_T = 10 \text{ nA}$ 、 $I_s = 100 \text{ nA}$ 、 $\beta = 5$  および  $w = 4$  にそれぞれ設定した．また、回路を構成するトランジスタのゲート長は  $L = 12 \mu\text{m}$  とした．図10に、 $I_{u_1} - I_{u_2}$  相空間における軌道を示す．以上の結果より、神経振動子回路が安定した発振をすることが確認できる．この回路の平衡点は次式：

$$\frac{dI_{u_i}}{dt} = \frac{dI_{v_i}}{dt} = 0, \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

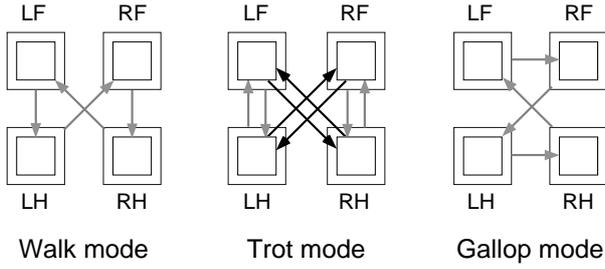


図 8 CPG ネットワーク回路の構成 .

より ,

$$I_{u_{o_i}} = I_s - \beta I_{v_{o_i}} - w I_{u_{o_i}}, \quad I_{v_{o_i}} = I_{u_{o_i}} \quad (11)$$

の解となる . ここで ,  $I_{u_{o_i}}$  および  $I_{v_{o_i}}$  は回路の平衡点を表す . この場合 ,  $I_{u_{o_i}} = I_{v_{o_i}} = I_s/10$  となり , シミュレーション結果に一致することを確認できる .

次に , CPG ネットワーク回路の動作特性について示す . 図 8 に示した Walk および Trot に対応した CPG 回路についてそれぞれシミュレーションを行った .

図 11 に , Walk に対応した CPG 回路の動作を示す . 各脚に対応した神経振動子回路が位相差  $90^\circ$  で同期して発振することが確認できる . この回路の動作は次式 :

$$\tau \frac{dI_{u_{\{1,2\}}}^{LF}}{dt} = -I_{u_{\{1,2\}}}^{LF} + f(I_{s,u_{\{1,2\}}}^{LF} - \beta I_{v_{\{1,2\}}}^{LF} - w I_{u_{\{2,1\}}}^{LF}) \quad (12)$$

$$\tau \frac{dI_{u_{\{1,2\}}}^{LH}}{dt} = -I_{u_{\{1,2\}}}^{LH} + f(I_{s,u_{\{1,2\}}}^{LH} - \beta I_{v_{\{1,2\}}}^{LH} - w I_{u_{\{2,1\}}}^{LH}) \quad (13)$$

$$\tau \frac{dI_{u_{\{1,2\}}}^{RF}}{dt} = -I_{u_{\{1,2\}}}^{RF} + f(I_{s,u_{\{1,2\}}}^{RF} - \beta I_{v_{\{1,2\}}}^{RF} - w I_{u_{\{2,1\}}}^{RF}) \quad (14)$$

$$\tau \frac{dI_{u_{\{1,2\}}}^{RH}}{dt} = -I_{u_{\{1,2\}}}^{RH} + f(I_{s,u_{\{1,2\}}}^{RH} - \beta I_{v_{\{1,2\}}}^{RH} - w I_{u_{\{2,1\}}}^{RH}) \quad (15)$$

$$\tau \frac{dI_{v_{\{1,2\}}}^{LF}}{dt} = -I_{v_{\{1,2\}}}^{LF} + f(I_{v_{\{1,2\}}}^{LF}) \quad (16)$$

$$\tau \frac{dI_{v_{\{1,2\}}}^{LH}}{dt} = -I_{v_{\{1,2\}}}^{LH} + f(I_{v_{\{1,2\}}}^{LH}) \quad (17)$$

$$\tau \frac{dI_{v_{\{1,2\}}}^{RF}}{dt} = -I_{v_{\{1,2\}}}^{RF} + f(I_{v_{\{1,2\}}}^{RF}) \quad (18)$$

$$\tau \frac{dI_{v_{\{1,2\}}}^{RH}}{dt} = -I_{v_{\{1,2\}}}^{RH} + f(I_{v_{\{1,2\}}}^{RH}) \quad (19)$$

に従う . また ,

$$I_{s,u_1}^{LF} = I_s + \gamma I_{u_1}^{RH}, \quad I_{s,u_2}^{LF} = I_s \quad (20)$$

$$I_{s,u_1}^{LH} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LH}, \quad I_{s,u_2}^{LH} = I_s \quad (21)$$

$$I_{s,u_1}^{RF} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LF}, \quad I_{s,u_2}^{RF} = I_s \quad (22)$$

$$I_{s,u_1}^{RH} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LH}, \quad I_{s,u_2}^{RH} = I_s \quad (23)$$

である . ここで , 各結合係数はそれぞれ  $\beta = 3$  ,  $w = 3$  および  $\gamma = 0.33$  に設定した . Walk に対応した CPG 回路の結合構造は Gallop に対応した CPG 回路の結合構造と位相幾何学的に等しい . よって , (20)-(23) の LF, LH, RF および RH の添字の順序を変更することにより Gallop に対応した発振パターン

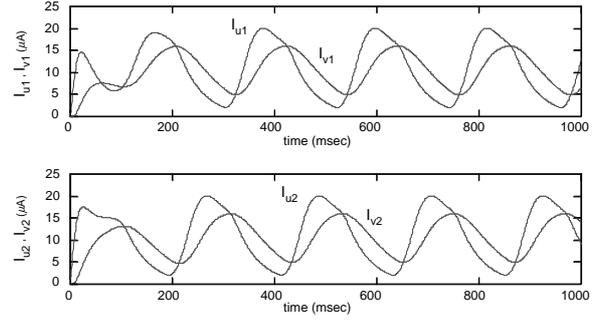


図 9 神経振動子回路の動作 .

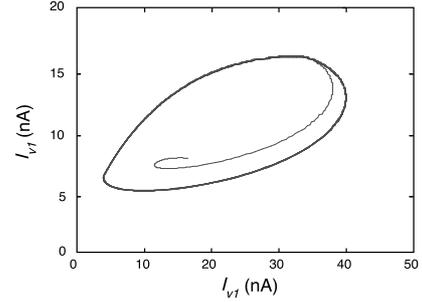


図 10 神経振動子回路の相平面上の軌道 .

を生成することができる .

図 12 に , Trot に対応した CPG 回路の動作を示す . 対角線上に位置する脚に対応した神経振動子回路が同相同期し , 前後の位置する脚に対応した神経振動子回路と逆相同期することが確認できる . この回路の動作は (12)-(19) に従う . また ,

$$I_{s,u_1}^{LF} = I_s + \gamma I_{u_1}^{RH} + \gamma I_{u_2}^{RH}, \quad I_{s,u_2}^{LF} = I_s \quad (24)$$

$$I_{s,u_1}^{LH} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LH} + \gamma I_{u_2}^{LH}, \quad I_{s,u_2}^{LH} = I_s \quad (25)$$

$$I_{s,u_1}^{RF} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LF} + \gamma I_{u_2}^{RH}, \quad I_{s,u_2}^{RF} = I_s \quad (26)$$

$$I_{s,u_1}^{RH} = I_s + \gamma I_{u_1}^{LH} + \gamma I_{u_2}^{RH}, \quad I_{s,u_2}^{RH} = I_s \quad (27)$$

である . ここで , 各結合係数はそれぞれ  $\beta = 3$  ,  $w = 3$  および  $\gamma = 0.33$  に設定した .

以上の結果より , CPG ネットワーク回路が歩行パターンに対応した , 位相同期した発振パターンを生成することが確認できた . 木村らの研究では , 松岡によって提案された神経振動子の結合系によって脊椎動物の代表的な歩行パターンに対応した発振パターンを生成することが示されている [8] . 同様に , ここで構成した CPG 回路もその結合構造に応じて , ここで示したパターン以外の発振パターンを生成することができる . また , CPG 回路を構成する神経振動子回路のバイアス電流を調節することによって , 回路全体の発振周波数と振幅を波形を変化させることなく広範囲に制御することができる . これらの性質は , 歩行ロボットの制御を行う CPG 回路に適したものである .

## 5. ま と め

本研究では , 生物の歩行運動の制御機構を模擬する集積回路について提案した . 提案回路は , 松岡によって提案された神経振動子に修正を加えたものを構成要素として CPG モデルを構成し , 電流モードアナログ回路として設計した . 提案回路

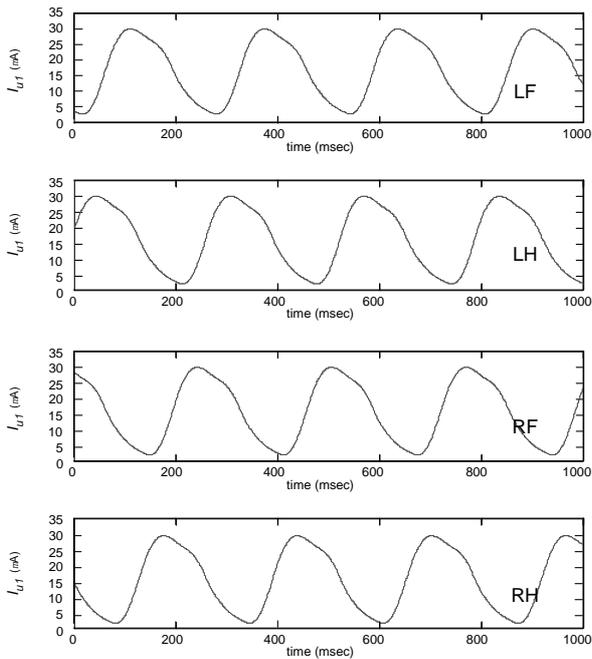


図 11 CPG ネットワーク回路の動作 (Walk mode) .

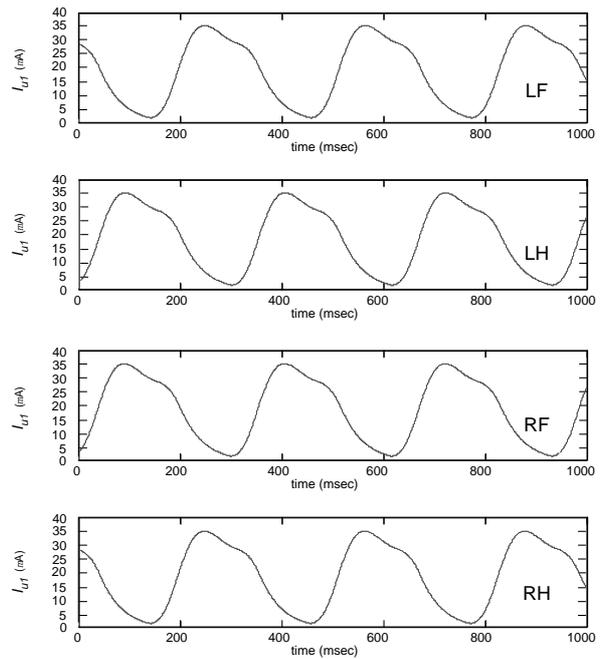


図 12 CPG ネットワーク回路の動作 (Trot mode) .

は、脊椎動物の代表的な歩行パターンである Walk, Trot および Gallop に対応した、位相同期した発振パターンを生成することができる。また、バイアス電流を調節することによって、その発振周波数と振幅を広範囲に制御することができる。さらに、提案回路は弱反転領域で動作する電流モードアナログ回路であるため、低消費電力が期待できる。以上の性質は、歩行ロボットの制御を行う CPG 回路、特に超小型ロボットを制御する CPG 回路に適したものである。今後の研究として、提案回路の試作および超小型歩行ロボットへの実装について検討を行っている。

## 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] K. Matsuoka, "Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation." *Biol. Cybern.*, vol. 52, pp. 367-376, 1983.
- [4] K. Matsuoka, "Mechanism of frequency and pattern control in the neural rhythm generators," *Biol. Cybern.*, vol. 56, pp. 345-353, 1987.
- [5] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biol. Cybern.*, vol. 65, pp.147-159, 1991.
- [6] M. Williamson, "Neural Control of Rhythmic Arm Movements" *Neural Networks, special issue on neural control of movement*, 1998.
- [7] S. Kotosaka, S. Schaal, "Synchronized robot drumming by neural oscillator", *J. Robotics Society of Japan*, vol. 19, no. 1, pp.116-123, 2001.
- [8] 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.

- [9] M. Simoni and S. DeWeerth, "Adaptation in a VLSI model of a neuron" *IEEE, Trans. Circuits Syst.-II*, vol. 46, no.7, pp. 967-970, 1999.
- [10] M. A. Lewis, M. J. Hartmann, R. Etienne Cummings, A. H. Cohen, "Control of acrobot leg with an adaptive aVLSI CPG chip," *Neurocomputing*, vol. 38-40, pp. 1409-1421, 2001.
- [11] G. Patel, J. Holleman, S. DeWeerth, "Analog VLSI model of intersegmental coordination with nearest neighbor coupling" , *Adv. Neural Information Processing*, vol. 10, pp. 791-725, 1998.
- [12] K. Nakada, T. Asai, and Y. Amemiya, "An analog CMOS central pattern generator for interlimb coordination in quadruped locomotion," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 14, no. 5, pp. 1356-1365, 2003.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] R. D. Beer, H. J. Chiel, and J. C. Gallagher, "Evolution and analysis of model CPGs for walking II: General principles and individual variability", *J. Comput. Neurosci.*, vol. 7, pp. 119-147, 1999
- [16] J. Mulder, A. C. van der Woerd, W. A. Serdijn, H. M. van Roermund, "General current-mode analysis method for translinear filters," *IEEE Tran. Circuits and Syst. -I*, vol. 44, pp. 193-197, 1997.
- [17] A. McEwan and A. van Schaik "A silicon representation of the meddiss inner hair cell model," in *Proc. the ICSC Symposia on Intelligent Systems and Application*, paper 1544-078, 2000.
- [18] W. Germanovix, C. Toumazou, "Design of a micropower current-mode log-domain analog cochlear implant", *IEEE Tran. Circuits and Syst. -II*, Vol. 47, No. 10, pp. 1023-106, 2000.