

生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路

- Amari-Hopfield アナログ CPG 回路と Wilson-Cowan アナログ CPG 回路の比較 -

中田 一紀[†] 浅井 哲也[†] 雨宮 好仁[†]

[†] 北海道大学工学部 電子情報工学科

〒 060-8628 北海道札幌市北区北 1 3 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。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により生成/制御される。近年、この CPG による移動運動の制御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。しかし、そのような研究のほとんどはディ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量や消費電力、消費面積などの点で問題が少なくない。そこで本研究では、ロボティクスにおける移動運動の制御、特にリズム協調運動の制御を行う CPG のアナログ CMOS 回路化を行う。また、アナログ回路の非線形性を生かすために、Amari-Hopfield 神経振動子モデルと Wilson-Cowan 神経振動子モデルのそれぞれに基づくネットワークモデルを考え、両者の回路化を行った。SPICE シミュレーションにより、それぞれの回路において複数の振動パターンの生成と外乱に対する安定性を確認した。

キーワード アナログ CMOS 回路, CPG, 結合神経振動子, 移動運動, 運動制御

Analog CMOS Circuits for Bio-Inspired Locomotion Controller

- A Comparison with Amari-Hopfield Analog CPG Circuit and Wilson-Cowan Analog CPG Circuit -

Kazuki NAKADA[†], Tetsuya ASAI[†], and Yoshihito AMEMIYA[†]

[†] 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 In this report, we propose analog CMOS circuits that control rhythmic movements of locomotion in robotics. Animal locomotion, such as walking, running, swimming and flying is generated and controlled by the biological neural network, called the central pattern generator (CPG). In recent years, many researchers have applied CPG to movement control in robotics. However, most of these have been developed with digital processors that have several problems such as high power consumption. Hence, we designed two analog CMOS circuits that control rhythmic coordination of locomotion in robotics. In order to make use of the nonlinearity of analog circuit efficiently, each circuit is based on the Amari-Hopfield neuron model and Wilson-Cowan neuron model respectively. We confirmed operation of the circuits by using SPICE. As a result, it was shown that each circuit has the capability of generating various rhythmic patterns and the stability to disturbance.

Key words Analog CMOS circuit, CPG, Coupled neural oscillators, Locomotion, Movement control

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によって生成される周期的なリズム運動を基本としている [1]。CPG は、神経振動子の集団によって構成され、上位中枢からの司令入力により誘発されると、神経活動の周期的振動パターンを自律的に生成する。また、感覚神経からのフィードバック入力に応じて、その発振周期や位相を調整することで、周囲の状況の変化に対する適応を示す [2]。さらに、状況に応じて振動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、ロボティクスにおいて、このような CPG の振る舞いを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 [4] - [8]。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、歩行運動を制御する CPG のモデルを提案した [4]。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、四脚型移動ロボットの制御を行っている [5]。このような CPG による移動運動の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、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) 神経振動子の相互引き込みにより環境の変動に対して柔軟かつ安定した移動運動を実現できる。

本研究では、以上の利点に着目して、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の制御を行う CPG の回路化を行う。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ほとんどであり、実時間処理に伴う計算量や消費電力などの点で問題が少なくない。そこで、本研究では、それらの問題を解決するために、アナログ CMOS 回路として回路を構成した。また、アナログ回路の非線形特性を生かすために、Amari-Hopfield 神経振動子モデルと Wilson-Cowan 神経振動子モデルのそれぞれのモデルに基づく回路を考案した。

2. CPG による移動運動の制御

生物の移動運動における CPG の役割のひとつに、各肢の運動の生成および制御がある。各関節を制御する神経振動子が相互作用し、各関節が協調して動作することにより、安定した運動パターンを生成する。また、もうひとつの役割に、各肢間の協調運動の制御がある。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、全体として安定した振動パターンを生成する。この結果、各肢間の協調運動が制御される。特に、多脚動物において、このような各肢間の協調運動は、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、各肢を制御する CPG 間の協調関係が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、神経修飾物質の動きにより、各体節を制御する CPG の協調動作が変わり、それによって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 [1]。

図 1 に、脊椎動物における代表的な歩行パターンを示す。ここで、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 ネットワークは、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。

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系を考える。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 Amari-Hopfield 神経振動子モデル

神経振動子モデルのひとつである Amari-Hopfield model [10] により、リズム協調運動を制御する CPG ネットワークを構成する。

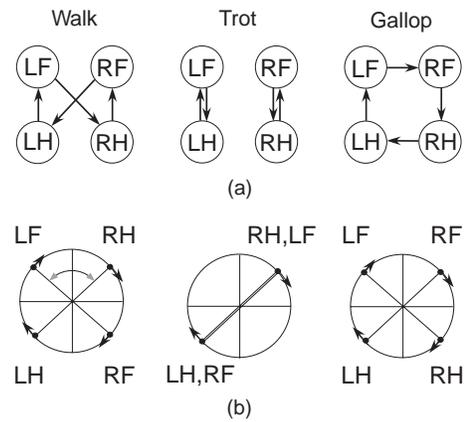


図 1 (a) 脊椎動物の代表的な歩行パターン (歩容)。(b) 各歩行パターンにおける相対位相差。

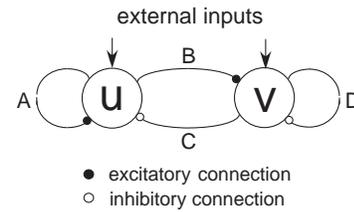


図 2 興奮性-抑制性ニューロン対。

このモデルは、興奮性-抑制性ニューロン対 (図 2) のひとつであり、そのダイナミクスは次の微分方程式:

$$\begin{cases} \tau_u \dot{u} = -u + A \cdot f_\mu(u) - C \cdot f_\mu(v) + S_u(t) \\ \tau_v \dot{v} = -v + B \cdot f_\mu(u) - D \cdot f_\mu(v) + S_v(t) \end{cases} \quad (1)$$

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、 $S_u(t), S_v(t)$ は外部入力、 τ_u, τ_v は時定数を表す。また、 $f_\mu(\cdot)$ は次式:

$$f_\mu(x) = \tanh(\mu x) \quad (2)$$

の双曲線正接関数であり、 μ 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、リミットサイクルを生成する。

さらに、複数の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 ネットワークを構成する。リズム協調運動を制御するためには、多様な振動パターンを生成する必要がある。また、振動パターン間の移行を速やかに行う必要がある。そこで、ネットワーク構成に対称結合と介在ユニットを導入する [8], [9]。図 3 に、その概念図を示す。これにより、多様な振動パターンの生成が可能になる。図 4 (a), (b), (c) にそれぞれ Walk, Trot, Gallop に対応した振動パターンを生成する場合の結合構造を示す。さらに、これらの結合構造を切り替えることにより、複数の CPG 間の協調動作を変化させ、振動パターン間の速やかな移行を実現することができる [9]。

ここで、ネットワークダイナミクスは、以下の微分方程式:

$$\begin{aligned} \tau_u \dot{u}^{\{0,1,2,3\}} = & -u^{\{0,1,2,3\}} + A f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + A_w f_\mu(u_w^{\{2,3,1,0\}}) + A_g f_\mu(u_g^{\{2,0,3,1\}}) \\ & - C_{lr} f_\mu(v^{\{1,0,3,2\}}) - C_{fh} f_\mu(v^{\{2,3,0,1\}}) \\ & - C f_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) + I_u^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau_v \dot{v}^{\{0,1,2,3\}} = -v^{\{0,1,2,3\}} + B f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}})$$

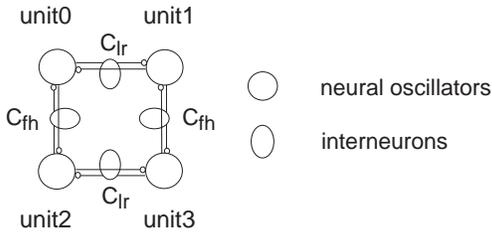


図3 ネットワークの基本構成.

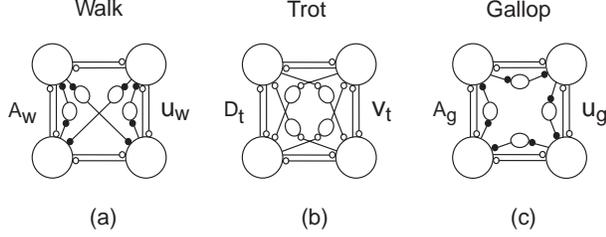


図4 結合構造.(a) Walk mode.(b) Trot mode.
(c) Gallop mode.

$$-D_t f_\mu(v_t^{\{3,2,1,0\}}) + I_v^{\{0,1,2,3\}} \quad (4)$$

$$\tau \dot{u}_w^{\{0,1,2,3\}} = -u_w^{\{0,1,2,3\}} + A_w f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) + I_{u_w}^{\{0,1,2,3\}} \quad (5)$$

$$\tau \dot{u}_g^{\{0,1,2,3\}} = -u_g^{\{0,1,2,3\}} + A_g f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) + I_{u_g}^{\{0,1,2,3\}} \quad (6)$$

$$\tau \dot{v}_t^{\{0,1,2,3\}} = -v_t^{\{0,1,2,3\}} - D_t f_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) + I_{v_t}^{\{0,1,2,3\}} + I_{x_t}^{\{0,1,2,3\}} \quad (7)$$

に従う。ここで、添え字は各ユニットの番号を表す。また、 u 、 u_w および u_g は興奮性神経細胞、 v 、 v_t は抑制性神経細胞の平均膜電位を表す。また、 τ は時定数、 A 、 A_w 、 A_g 、 B 、 C 、 C_{lr} 、 C_{fh} および D_t は結合係数、 I_u 、 I_v 、 I_{u_w} 、 I_{u_g} 、 I_{v_t} および I_{x_t} は外部入力を表す。

3.2 Wilson-Cowan 神経振動子モデル

神経振動子モデルとして、Wilson-Cowan model [11] を考える。このモデルもまた、興奮性-抑制性ニューロン対のひとつであり、そのダイナミクスは次の微分方程式:

$$\begin{cases} \tau_x \dot{x} = -x + f_\mu(Ax - Cy + S_x(t)) \\ \tau_y \dot{y} = -y + f_\mu(Bx - Dy + S_y(t)) \end{cases} \quad (8)$$

に従う。ここで、 x 、 y 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、 $S_x(t)$ 、 $S_y(t)$ は外部入力、 τ_x 、 τ_y は時定数を表している。

Wilson-Cowan 神経振動子モデルは、次式の変換:

$$\begin{cases} u = Ax - Cy + S_x, S_x = S_u \\ v = Bx - Dy + S_y, S_y = S_v \end{cases} \quad (9)$$

により、Amari-Hopfield 神経振動子モデルに変換できる。この変換は Affine 変換であることから、この逆もまた成り立ち、式 (1) と (8) は等価になる。

さらに、多変数の Wilson-Cowan 神経振動子モデル:

$$\begin{cases} \tau \dot{x}_i = -x_i + f_\mu(\sum_j A_{ij} x_j - \sum_j C_{ij} y_j + S_{x_i}) \\ \tau \dot{y}_i = -y_i + f_\mu(\sum_j B_{ij} x_j - \sum_j D_{ij} y_j + S_{y_i}) \end{cases} \quad (10)$$

も同様の変換:

$$\begin{cases} u_i = \sum_j A_{ij} x_j - \sum_j C_{ij} y_j + S_{x_i}, S_{x_i} = S_{u_i} \\ v_i = \sum_j B_{ij} x_j - \sum_j D_{ij} y_j + S_{y_i}, S_{y_i} = S_{v_i} \end{cases} \quad (11)$$

により、多変数の Amari-Hopfield 神経振動子モデル:

$$\begin{cases} \tau \dot{u}_i = -u_i + \sum_j A_{ij} f_\mu(u_j) - \sum_j C_{ij} f_\mu(v_j) + S_{u_i} \\ \tau \dot{v}_i = -v_i + \sum_j B_{ij} f_\mu(u_j) - \sum_j D_{ij} f_\mu(v_j) + S_{v_i} \end{cases} \quad (12)$$

と等価になる。

これを式 (3)-(7) に適用することで、次式:

$$\tau \dot{x}^{\{0,1,2,3\}} = -x^{\{0,1,2,3\}} + f_\mu(z_x^{\{0,1,2,3\}}) \quad (13)$$

$$\tau \dot{y}^{\{0,1,2,3\}} = -y^{\{0,1,2,3\}} + f_\mu(z_y^{\{0,1,2,3\}}) \quad (14)$$

$$\tau \dot{x}_w^{\{0,1,2,3\}} = -x_w^{\{0,1,2,3\}} + f_\mu(z_w^{\{0,1,2,3\}}) \quad (15)$$

$$\tau \dot{x}_g^{\{0,1,2,3\}} = -x_g^{\{0,1,2,3\}} + f_\mu(z_g^{\{0,1,2,3\}}) \quad (16)$$

$$\tau \dot{y}_t^{\{0,1,2,3\}} = -y_t^{\{0,1,2,3\}} - f_\mu(z_t^{\{0,1,2,3\}}) \quad (17)$$

のネットワークダイナミクスを得る。ただし、

$$\begin{aligned} z_x^{\{0,1,2,3\}} &= Ax^{\{0,1,2,3\}} + A_w x_w^{\{2,3,1,0\}} + A_g x_g^{\{2,0,3,1\}} \\ &\quad - C_{lr} y^{\{1,0,3,2\}} - C_{fh} y^{\{2,3,0,1\}} - C_y^{\{0,1,2,3\}} \\ &\quad + V_x^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$z_y^{\{0,1,2,3\}} = Bx^{\{3,2,1,0\}} - D_t y_t^{\{3,2,1,0\}} + V_y^{\{0,1,2,3\}} \quad (19)$$

$$z_w^{\{0,1,2,3\}} = A_w x^{\{0,1,2,3\}} + V_{x_w}^{\{0,1,2,3\}} \quad (20)$$

$$z_g^{\{0,1,2,3\}} = A_g x^{\{0,1,2,3\}} + V_{x_g}^{\{0,1,2,3\}} \quad (21)$$

$$z_t^{\{0,1,2,3\}} = -D_t v^{\{0,1,2,3\}} + V_{y_t}^{\{0,1,2,3\}} + V_{x_t}^{\{0,1,2,3\}} \quad (22)$$

である。ここで、添え字は各ユニットの番号を表す。また、 x 、 x_w および x_g は興奮性神経細胞、 y 、 y_t は抑制性神経細胞の平均膜電位を表す。また、 τ は時定数、 A 、 A_w 、 A_g 、 B 、 C 、 C_{lr} 、 C_{fh} および D_t は結合係数、 V_x 、 V_y 、 V_{x_w} 、 V_{x_g} 、 V_{y_t} および V_{x_t} は外部入力を表す。

4. 回路構成

ここでは、リズム協調運動を制御する CPG のアナログ CMOS 回路化について説明する。

4.1 Amari-Hopfield アナログ CPG 回路

Amari-Hopfield 神経振動子モデルに基づくアナログ CPG 回路について説明する。回路は、基本的なアナログ回路である差動対、カレントミラー、CR 回路および定電流源により構成した。

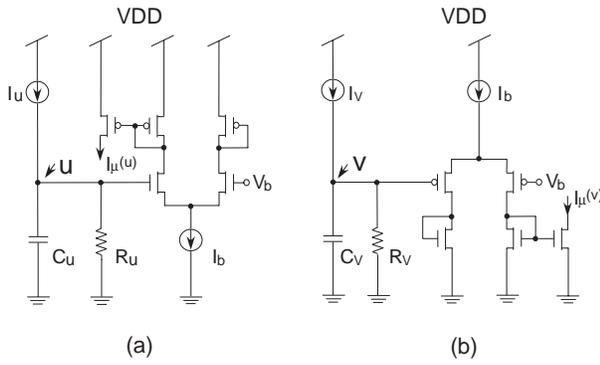


図5 (a) 興奮性-神経細胞回路 . (b) 抑制性-神経細胞回路.

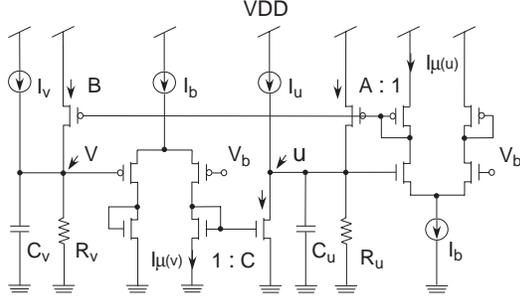


図6 神経振動子回路.

差動対は定電流源と二つの MOS FET を組み合わせた回路であり、使用する MOS FET の種類によって二つのタイプがある。回路を構成する MOS FET が弱反転領域で動作する場合、差動対の入出力特性は、次式:

$$I_{\mu}(V_{dif}) = I_b \frac{1 + \tanh(\mu V_{dif})}{2}, \quad V_{dif} = V - V_b \quad (23)$$

に従う [12]。ここで、 V, V_b は入力電圧およびバイアス電圧、 I_{out}, I_b は出力電流およびバイアス電流を表す。また、 $\mu = \kappa/2V_T$ であり、 V_T は thermal voltage で約 26 mV、 κ は製造プロセスに依存する物理パラメータである。

ここで、興奮性の神経細胞回路について説明する。図5 (a) に回路構成を示す。回路は、差動対、CR 回路および定電流源を組み合わせた構成をしており、その動作は次式:

$$C_u \dot{u} = -\frac{u}{R_u} + I_u(t) \quad (24)$$

に従う。ここで、 u は電圧、 C_u, R_u は容量および抵抗の値をそれぞれ表す。また、 $I_u(t)$ は外部からの制御電流を表す。電圧 u に依存する差動対の電流が回路の出力となる。

次に、抑制性の神経細胞回路について説明する。図5 (b) に回路構成を示す。回路の動作は、興奮性神経回路と同様、次式:

$$C_v \dot{v} = -\frac{v}{R_v} + I_v(t) \quad (25)$$

に従う。ここで、 v は電圧、 C_v, R_v は容量および抵抗の値をそれぞれ表す。また、 $I_v(t)$ は外部からの制御電流を表す。電圧 v に依存する差動対の電流が回路の出力となる。

上記の興奮性神経回路と抑制性神経回路を組み合わせることによって、神経振動子回路を構成する。図6にその回路構成を示す。また、回路動作は、次式:

$$\begin{cases} C_u \dot{u} = -\frac{u}{R_u} + A \cdot I_{\mu}(u) - C \cdot I_{\mu}(v) + I_u(t) \\ C_v \dot{v} = -\frac{v}{R_v} + B \cdot I_{\mu}(u) + I_v(t) \end{cases} \quad (26)$$

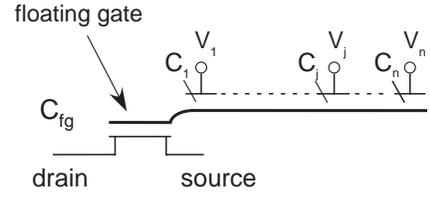


図7 ν MOS FET.

に従う。ここで、 A, B および C は各結合係数を表しており、カレントミラーを構成する MOS FET のサイズ比によって決まる。また、 $I_{\mu}(u), I_{\mu}(v)$ は興奮性および抑制性神経回路の出力電流をそれぞれ表す。カレントミラーは、これらの電流を転写した後、再び回路に入力する。興奮性神経回路と抑制性神経回路の相互作用により、周期的振動パターンが生成される。

複数の神経振動子回路と興奮性および抑制性神経回路を組み合わせることにより、ネットワーク回路を構成する。回路構成は、(3)-(7)に従って行う。そこで、以下のように、(3)-(7)の各パラメータを物理量に置き換える:

$$\begin{aligned} C_r \dot{u}^{\{0,1,2,3\}} &= -\frac{u^{\{0,1,2,3\}}}{R} + A I_{\mu}(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ &\quad + A_w I_{\mu}(u_w^{\{2,3,1,0\}}) + A_g I_{\mu}(u_g^{\{2,0,3,1\}}) \\ &\quad - C_{lr} I_{\mu}(v^{\{1,0,3,2\}}) - C_{fh} I_{\mu}(v^{\{2,3,0,1\}}) \\ &\quad - C I_{\mu}(v^{\{0,1,2,3\}}) + I_u^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} C_r \dot{v}^{\{0,1,2,3\}} &= -\frac{v^{\{0,1,2,3\}}}{R} + B I_{\mu}(v^{\{0,1,2,3\}}) \\ &\quad - D_t I_{\mu}(v_t^{\{3,2,1,0\}}) + I_v^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} C_r \dot{u}_w^{\{0,1,2,3\}} &= -\frac{u_w^{\{0,1,2,3\}}}{R} + A_w I_{\mu}(u_w^{\{0,1,2,3\}}) \\ &\quad + I_{u_w}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} C_r \dot{u}_g^{\{0,1,2,3\}} &= -\frac{u_g^{\{0,1,2,3\}}}{R} + A_g I_{\mu}(u_g^{\{0,1,2,3\}}) \\ &\quad + I_{u_g}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} C_r \dot{v}_t^{\{0,1,2,3\}} &= -\frac{v_t^{\{0,1,2,3\}}}{R} - D_t I_{\mu}(v_t^{\{0,1,2,3\}}) \\ &\quad + I_{v_t}^{\{0,1,2,3\}} + I_{x_t}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、 C_r, R は容量および抵抗の値をそれぞれ表しており、(3)-(7)における時定数 τ に $C_r \cdot R$ が対応する。また、 $A, A_w, A_g, B, C, C_{lr}, C_{fh}$ および D_t は各結合係数を表しており、その値はカレントミラーを構成する MOS FET のサイズ比によって決まる。さらに、 $I_{\mu}(\cdot)$ は各差動対の出力電流であり、 $I_u, I_v, I_{u_w}, I_{u_g}, I_{v_t}$ および I_{x_t} は外部からの入力電流である。

4.2 Wilson-Cowan アナログ CPG 回路

Wilson-Cowan 神経振動子モデルに基づくアナログ CPG 回路について説明する。回路は、 ν MOS 差動対、カレントミラー、CR 回路および低電流源により構成した。

ν MOS 差動対は、定電流源と二つの ν MOS FET [13] を組み合わせた回路である。 ν MOS FET は、フローティングゲートと複数の入力ゲートを持っている (図7)。フローティングゲート

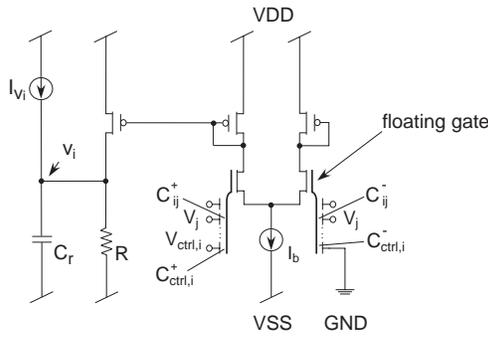


図8 基本構成回路 .

と各入力ゲートの結合容量を $C_j (j = 1, \dots, n)$ 、フローティングゲートと基板間の容量を C_{fg} とし、初期電荷を 0 としたとき、フローティングゲートの電位 V_{fg} は次式:

$$V_{fg} = \frac{\sum_j C_j V_j}{\sum_j C_j + C_{fg}} \simeq \sum_j \left(\frac{C_j}{\sum_j C_j} \right) V_j, \quad C_{fg} \ll C_j \quad (32)$$

に従う。ここで、 $V_j (j = 1, \dots, n)$ は各入力ゲートの電位を表す。これにより、 ν MOS FET は電圧の重み付き線形和に応じた電流を出力する。差動対の入力部を ν MOS FET にすることで、(13)-(17) の右辺第 2 項を近似することができる。特に、 ν MOS 差動対を構成する ν MOS FET が弱反転領域で動作する場合、その入出力特性は、入力部の電位差を V_{dif} とすれば (23) に従う。

ν MOS 差動対、カレントミラー、CR 回路および定電流源を組み合わせることで、Wilson-Cowan アナログ CPG 回路の基本回路を構成する (図 8)。この回路の動作は次式:

$$C_r \dot{V}_i = -\frac{V_i}{R} + I_\mu (V_{dif}) + I_{V_i} \quad (33)$$

に従う。ただし、

$$V_{dif} = \sum_j \left(\frac{C_{ij}^+}{C_{all}} \right) V_j - \sum_j \left(\frac{C_{ij}^-}{C_{all}} \right) V_j + \frac{C_{ctrl,j}^+}{C_{all}} V_{ctrl,i} \quad (34)$$

$$C_{all} = \sum_j C_{ij}^+ + C_{ctrl,i}^+ = \sum_j C_{ij}^- + C_{ctrl,i}^- \quad (35)$$

である。ここで、 V_i は電圧、 C_r 、 $C_{ctrl,i}^\pm$ 、 $C_{ij}^\pm (i, j = 1, \dots, n)$ は容量、 R は抵抗の値をそれぞれ表す。また、 $V_{ctrl,i}$ は外部からの制御電圧、 I_{V_i} は外部からの入力電流を表す。

この回路の結合容量を (18)-(22) の各結合係数に従って設定し、(18)-(22) の各パラメータを物理量に置き換えることにより、ネットワーク回路を構成した。回路の動作は次式:

$$C_r \dot{x}^{\{0,1,2,3\}} = -\frac{x^{\{0,1,2,3\}}}{R} + I_\mu \left(\frac{\phi_x^{\{0,1,2,3\}}}{C_{all}} \right) + I_V \quad (36)$$

$$C_r \dot{y}^{\{0,1,2,3\}} = -\frac{y^{\{0,1,2,3\}}}{R} + I_\mu \left(\frac{\phi_y^{\{0,1,2,3\}}}{C_{all}} \right) + I_V \quad (37)$$

$$C_r \dot{x}_w^{\{0,1,2,3\}} = -\frac{x_w^{\{0,1,2,3\}}}{R} + I_\mu \left(\frac{\phi_w^{\{0,1,2,3\}}}{C_{all}} \right) + I_V \quad (38)$$

$$C_r \dot{x}_g^{\{0,1,2,3\}} = -\frac{x_g^{\{0,1,2,3\}}}{R} + I_\mu \left(\frac{\phi_g^{\{0,1,2,3\}}}{C_{all}} \right) + I_V \quad (39)$$

$$C_r \dot{y}_t^{\{0,1,2,3\}} = -\frac{y_t^{\{0,1,2,3\}}}{R} + I_\mu \left(\frac{\phi_t^{\{0,1,2,3\}}}{C_{all}} \right) + I_V \quad (40)$$

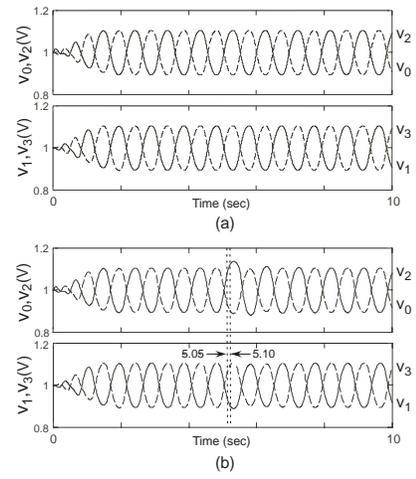


図9 Amari-Hopfield アナログ CPG 回路の動作.

に従う。また、

$$\begin{aligned} \phi_x^{\{0,1,2,3\}} = & Ax^{\{0,1,2,3\}} + A_w x_w^{\{2,3,1,0\}} + A_g x_g^{\{2,0,3,1\}} \\ & - C_{lr} y^{\{1,0,3,2\}} - C_{fh} y^{\{2,3,0,1\}} - C_y^{\{0,1,2,3\}} \\ & + \psi_x^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\phi_y^{\{0,1,2,3\}} = Bx^{\{3,2,1,0\}} - D_t y_t^{\{3,2,1,0\}} + \psi_y^{\{0,1,2,3\}} \quad (42)$$

$$\phi_w^{\{0,1,2,3\}} = A_w x^{\{0,1,2,3\}} + \psi_{x_w}^{\{0,1,2,3\}} \quad (43)$$

$$\phi_g^{\{0,1,2,3\}} = A_g x^{\{0,1,2,3\}} + \psi_{x_g}^{\{0,1,2,3\}} \quad (44)$$

$$\phi_t^{\{0,1,2,3\}} = -D_t v^{\{0,1,2,3\}} + \psi_{y_t}^{\{0,1,2,3\}} + \psi_{x_t}^{\{0,1,2,3\}} \quad (45)$$

である。ここで、 C_r は容量、 R は抵抗の値を表す。また、 ψ_x^k 、 ψ_y^k 、 $\psi_{x_w}^k$ 、 $\psi_{x_g}^k$ 、 $\psi_{y_t}^k$ および $\psi_{x_t}^k (k = 0, 1, 2, 3)$ は各制御ゲートの電荷、 I_{V_i} は外部からの入力電流を表す。

5. 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、提案回路の動作特性を確認した。

はじめに、Amari-Hopfield アナログ CPG 回路の動作を確認した。各歩容モードに対応する振動パターンの生成とそれらのモードの移行については、すでに確認している [12]。ここでは、振動パターンの安定性について調べた。以下、MOSIS AMIS LEVEL 3 1.5- μ m CMOS デバイスパラメータ、PSPICE によるシミュレーションを行った。

まず、Trot mode に対応する振動パターンを生成するために、各結合係数を次のように設定した:

$$(A, B, C, A_w, A_g, C_{lr}, C_{fh}, D_t) = (4, 3, 4, 0, 0, 1, 1, 1)$$

また、容量および抵抗の値はそれぞれ $C_r = 100$ nF、 $R = 1$ M Ω に設定した。さらに、電源電圧 $V_{DD} = 3.0$ V、各差動対のバイアス電圧、バイアス電流および制御電流は $V_b = 1.0$ V、 $(I_b, I_u, I_v, I_{uw}, I_{ug}, I_{vt}) = (0.1, 1.1, 0.9, 1.0, 1.0, 1.05)$ μ A、 $I_{xt}^0 = I_{xt}^3 = 2$ nA、 $I_{xt}^1 = I_{xt}^2 = 0$ A とした。このとき、逆同期の振動パターンを確認した (図 9 (a))。

ここで、外部からの入力として、時刻 $5.0 \rightarrow 5.05$ s に 900nA の電流を与えた。このとき、入力によって振動パターンの振幅と位相が変化するが、一周期以内にもとの振動パターンに戻る事が確認できた (図 9 (b))。

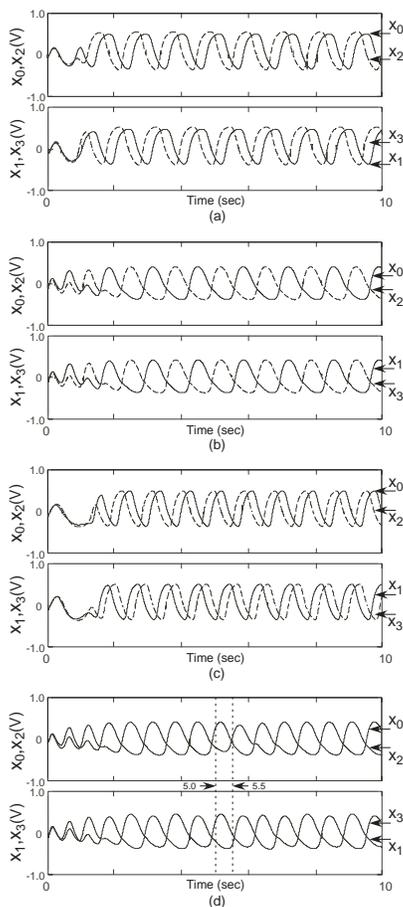


図 10 Wilson-Cowan アナログ CPG 回路の動作。

次に、Wilson-Cowan アナログ CPG 回路の動作を確認した。ここでは、各歩容モードに対応する振動パターンの生成と安定性について調べた。以下、MOSIS AMIS LEVEL 49 1.5- μm CMOS 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。

まず、共通のパラメータとして、各結合係数の比を次のように設定した：

$$A : B : C : C_{lr} : C_{fh} = 4.5 : 3.0 : 4.5 : 1.0 : 1.0$$

ただし、 $C_{all} = 100$ pF とした。また、各抵抗および容量の値をそれぞれ $C_r = 100$ nF、 $R = 2$ M Ω とした。さらに、電源電圧 $V_{DD} = 1.5$ V、 $V_{DD} = -2.0$ V、各差動対のバイアス電流は $I_b = 500$ nA、外部電流は $I_V = 750$ nA とした。

ここで、Walk mode に対応した振動パターンを生成するために、各結合係数に対応する容量を $(A_w, A_g, D_t) = (45, 0, 0)$ pF に設定した。このとき、図 10(a) の振動パターンを得た。

次に、Trot mode に対応した振動パターンを生成するために、各結合係数に対応する容量を $(A_w, A_g, D_t) = (0, 0, 10)$ pF に設定した。このとき、図 10(b) の振動パターンを得た。

さらに、Gallop mode に対応した振動パターンを生成するために、各結合係数に対応する容量を $(A_w, A_g, D_t) = (0, 30, 0)$ pF に設定した。このとき、図 10(c) の振動パターンを得た。

最後に、Trot mode において外部から入力を与え、その安定性について調べた。ユニット 0 の制御ゲート (20 pF) に、時刻 5.0 \rightarrow 5.5 s まで、50 mV の電圧を入力として与えた。このとき、入力によって振動パターンの振幅と位相が変化するが、一周期以内にもとの振動パターンに戻ることが確認できた (図 10(d))。ここでは、制御ゲートの電圧として入力を与えたが、これは各入力ゲートにノイズが加わった場合にも同じ効果を示すと見なせる。これは、外部からの摂動に対して、回路の振動モードが安定であることを示す。

6. 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 回路化を行った。CPG の回路化に当って、Amari-Hopfield 神経振動子モデルと Wilson-Cowan 神経振動子モデルに基づく CPG ネットワークモデルを考え、それぞれの回路化を行った。提案回路はいずれも差動対やカレントミラー、CR 回路などの基本的なアナログ回路によって構成することができる。また、低電流かつ低電圧で動作するため、低消費電力を実現できる。

提案回路の動作を確認するために、SPICE シミュレーションを行った。ここでは、特に外部からの入力に対する安定性に着目してシミュレーションを行った。提案回路はいずれも外部からの強い摂動に対して一周期以内に安定した振動パターンに復元した。特に、Wilson-Cowan アナログ CPG 回路においては、外部からの入力を電圧として与えることができる。これは、実際の回路化にとって利点となる。以上は、提案回路のリズム協調運動を制御する CPG 回路としての有用性を示す。

文献

- [1] F. Delcomyn, *Foundations of Neurobiology*, W.H. Freeman and Co, New York, 1997.
- [2] *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Second Edition*.M. Arbib Ed., USA, MIT PRESS, Press 2002.
- [3] K. Matsuoka, "Mechanism of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biological Cybernetics.*, vol.56, pp.345-353, 1987.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. J. Ijspeert and A. Billard, "Biologically inspired neural controllers for motor control in a quadruped robot," In *proc, International Joint Conference on Neural Network conference.*, 2000.
- [7] M. A. Lewis, M. J. Hartmann, 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.
- [8] H. Takemura, Y. Matsumoto, T. Ogasawara "Dnamic walking of an autonomus quadruped robot based on rhythmic generation," In *proc, CLAWAR2001*, 2001.
- [9] H. Nagashino, Y. Nomura and Y. Kinouchi. "Generation and Transitions of Phase-Locked Oscillations in Coupled Neural Oscillators", In *proc, The fortieth SICE Annual Conference*, 2001.
- [10] S. Amari, "Characteristic of the random nets of analog neuron-like elements," *IEEE trans. on System, Man and Cybernetics*, SMC-2, pp.643-657, 1972.
- [11] H. R. Wilson and J. D. Cowan, "Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons," *Biophysical Journal* 12, 1-24, 1972.
- [12] C. A. Mead, *Analog VLSI and Neural Systems*, Reading, Mass, Addison-Wesley, 1989.
- [13] K. Nakada, T. Asai, Y. Amemiya, "An analog CMOS circuit implementing CPG controller for quadruped walking robot", In *Proc, AMAM2003*, 2003.