

生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路

- リズム協調運動を制御する CPG の集積回路化 -

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が生成する周期的なリズム運動により駆動される。この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、柔軟かつ安定した移動運動が実現される。近年、このような 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ジタルプロセッサによる逐次処理を行うものであり、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 回路化を行い、SPICE シミュレーションによりその動作特性を確認した。その結果、複数の振動パターンの生成と振動パターン間の速やかな移行を確認することができた。

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

An analog CMOS circuit implementing controller for bio-inspired locomotion

- VLSI implementation of CPGs controlling rhythmic movements -

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

[†] Faculty of 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 an analog CMOS circuit that controls rhythmic movements of locomotion in robotics. Animal locomotion, such as walking, running, swimming and flying, is driven by the periodic rhythmic movements. Such rhythmic movements are generated by a central nervous system which is called the central pattern generator (CPG). As a result of the coordination of physical parts acquired by the rhythmic movements, stable locomotion is achieved. In recent years, many research efforts have applied such role of the CPG for movement control in robotics. However, most of these have been developed by using a digital processor, which has several problems such as high power consumption. Hence, we designed an analog CMOS circuit that controls rhythmic coordination of locomotion in robotics, and confirmed operation of the circuit by using SPICE simulation. As a result, it was shown that the proposed circuit had the capability to generate various rhythmic patterns and their transitions quickly.

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，周期的なリズム運動を基本としている．そして，それらのリズム運動を駆動するのは，CPG (Central Pattern Generator) とよばれる中枢神経系が生成する神経活動の周期的パターンである [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，CPG は，状況に応じて周期的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．たとえば，脊椎動物である馬では速度や酸素消費量に応じて複数の歩行パターンの中から最適なものを選択している [3]．

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]- [11]．多賀は，松岡によって提案された神経振動子 [?] 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 [5]．木村らは，そのモデルに反射機構を組み合わせることで，四脚型移動ロボットの制御を行っている [6]．また，A. Billrad と A. J. Ijspeert は，CPG により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の制御を行っている [7]．さらに，J. Shan と F. Nagashima は，ヒューマノイドロボットの制御に CPG を適用している [8]．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) 神経振動子の相互引き込みにより外乱に対して柔軟かつ安定した移動運動を実現する．

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の制御を行う CPG の回路化を行う．従来の研究では，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，消費電力や消費面積，計算量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する．また，SPICE シミュレーションによりその回路動作の確認を行う．

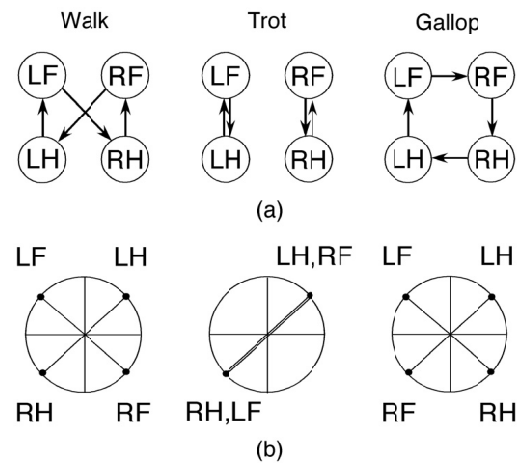


図1 (a) 代表的な歩行パターン (歩容) . (b) 各歩行パターンにおける相対位相差

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的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 [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 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

CPG の基本的なモデルを構成するのは，結合神経振動子である．ここでは，特にリズム協調運動を制御する CPG のモデルについて説明する．

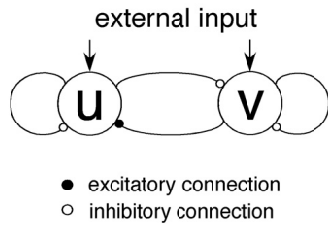


図2 興奮性-抑制性ニューロン対

3.1 神経振動子モデル

本研究では、CPGを構成する神経振動子のモデルとして、Amari-Hopfield neuron model [13]を選んだ。このモデルは興奮性-抑制性ニューロン対(図2)となっており、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 は興奮性および抑制性神経細胞の平均膜電位をそれぞれ表しており、 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 は時定数を表している。また、 $f_\mu(x)$ は次式:

$$f_\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\mu x)} \quad (2)$$

により定義されるシグモイド関数である。ここで、 μ は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、多様なダイナミクスを示す [13], [14]。図3にその典型的な場合について示す。図3 (a) はリミットサイクルとなる場合であり、 $A=C=10, B=12, D=0, S_u=0, S_v=6, \tau_u=\tau_v=1$ である。また、図3 (b) は安定平衡点となる場合であり、 $A=C=4, B=3, D=0, S_u=0, S_v=1.5, \tau_u=\tau_v=1$ である。

3.2 結合振動子モデル

複数の神経振動子を相互抑制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。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、振動パターンから異なる振動パターンへの移行を速やかに行う必要がある。そこで、モデルの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 [11], [12]。図4にその概念図を示す。これにより、多様な振動パターンを生成することができる。図5 (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

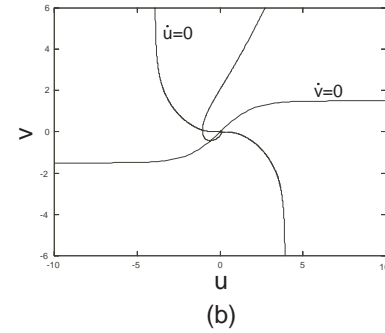
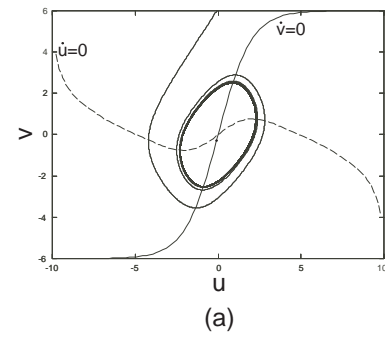


図3 (a) リミットサイクル, (b) 安定平衡点

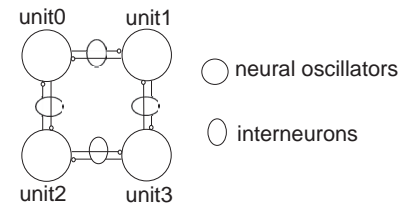


図4 基本構成

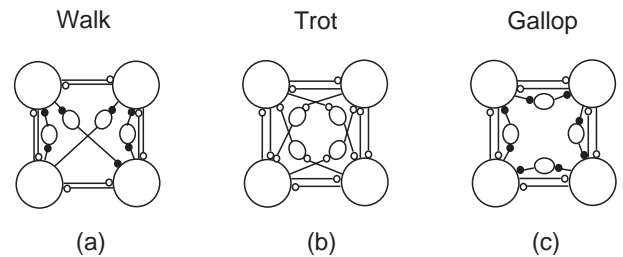


図5 結合構造. (a)Walk mode. (b)Trot mode. (c)Gallop mode.

合の結合構造を示す。これらの結合構造を切り替えることにより、多様な振動パターンの生成および振動パターン間の速やかな移行が実現できる [12]。

このネットワークのダイナミクスは次の微分方程式:

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

$$\begin{aligned}\tau_v \dot{v}^{\{0,1,2,3\}} = & -v^{\{0,1,2,3\}} + Bf_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & - D_t f_\mu(v_t^{\{3,2,1,0\}}) + I_v^{\{0,1,2,3\}}(t)\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\tau_w \dot{u}_w^{\{0,1,2,3\}} = & -u_w^{\{0,1,2,3\}} + A_w f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{uw}^{\{0,1,2,3\}}(t)\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\tau_g \dot{u}_g^{\{0,1,2,3\}} = & -u_g^{\{0,1,2,3\}} + A_g f_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{ug}^{\{0,1,2,3\}}(t) + I_{xg}^{\{0,1,2,3\}}(t)\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\tau_t \dot{v}_t^{\{0,1,2,3\}} = & -v_t^{\{0,1,2,3\}} - D_t f_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{vt}^{\{0,1,2,3\}}(t) + I_{xt}^{\{0,1,2,3\}}(t)\end{aligned}\quad (7)$$

に従う．ここで，上付き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_u ， τ_v ， τ_{uw} ， τ_{ug} および τ_{vt} 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_{uw} ， I_{ug} ， I_{vt} ， I_{xw} および I_{wg} は外部からの入力電流を表す．

4. 回路構成

リズム協調運動を制御するCPGをアナログCMOS回路化する．CPG回路を差動対，カレントミラー，CR回路および定電流源などの基本的なアナログ回路によって構成する．

4.1 振動子回路

はじめに，CPG回路を構成する最も基本的な回路のひとつである差動対について説明する．差動対は定電流源と二つのMOSFETを組み合わせた回路であり，使用するMOSFETの種類によって二つのタイプがある．図6(a),(b)にそれぞれの回路構成を示す．定電流源の電流値が100 nA程度であり，MOSFET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：

$$I_{out} = I_b \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\kappa}{V_T}(V_{in} - V_b)\right)} \quad (8)$$

に従う．つまり，シグモイド関数として振舞う[15]．ここで， V_{in} ， V_b は入力電圧およびバイアス電圧を表し， I_{out} ， I_b は出力電流およびバイアス電流を表す．また， V_T は熱起電力で約26 mV， κ は製造プロセ

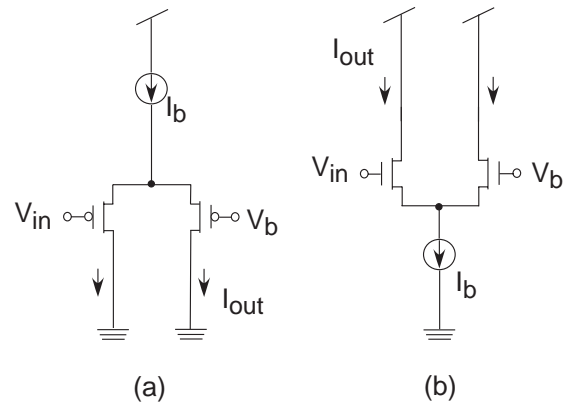


図6 差動対の回路構成

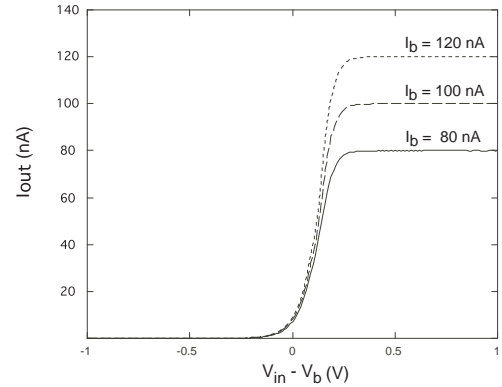


図7 差動対の電圧-電流特性

スに依存する物理パラメータである．図7にnMOS差動対の電圧-電流特性を示す．

次に，興奮性の神経細胞回路について説明する．図8に興奮性神経回路の構成を示す．興奮性神経回路は，差動対，CR回路および定電流源を組合せた回路構成をしており，そのダイナミクスは次式：

$$C_u \dot{u} = -\frac{u}{R_u} + I_u(t) \quad (9)$$

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電流となる．

次に，抑制性の神経細胞回路について説明する．図9に抑制性神経回路の構成を示す．抑制性神経回路は，差動対，CR回路および定電流源を組み合わせた回路構成であり，そのダイナミクスは次式：

$$C_v \dot{v} = -\frac{v}{R_v} + I_v(t) \quad (10)$$

に従う．ここで， v は電圧， C_v ， R_v は容量および抵

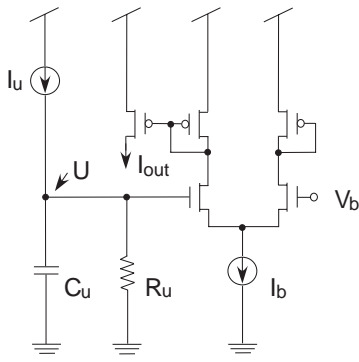


図 8 興奮性神経回路の構成

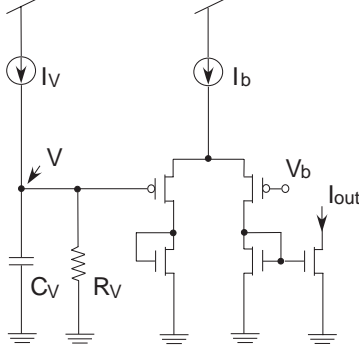


図 9 抑制性神経回路の構成

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．興奮性神経回路と同様，電圧 v に依存する差動対の電流が回路の出力電流となる．

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 10 にその回路構成を示す．また，回路ダイナミクスは次式：

$$\begin{cases} C_u \dot{u} = -\frac{u}{R_u} + A \cdot I_\mu(u) - C \cdot I_\mu(v) + I_u(t) \\ C_v \dot{v} = -\frac{v}{R_v} + B \cdot I_\mu(u) + I_v(t) \end{cases} \quad (11)$$

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， $I_\mu(u)$ ， $I_\mu(v)$ はそれぞれ興奮性および抑制性神経回路の出力電流である．カレントミラーは，この電流を転写した後，再び回路に入力する．この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．この振動パターンの周波数を制御するためには， $u-v$ 相平面におけるリミットサイクルの軌道を制御すれば良い．たとえば，発振周波数を高くしたい場合，抑制性神経回路に入力される電流 $B \cdot I_\mu(u)$ を興奮性

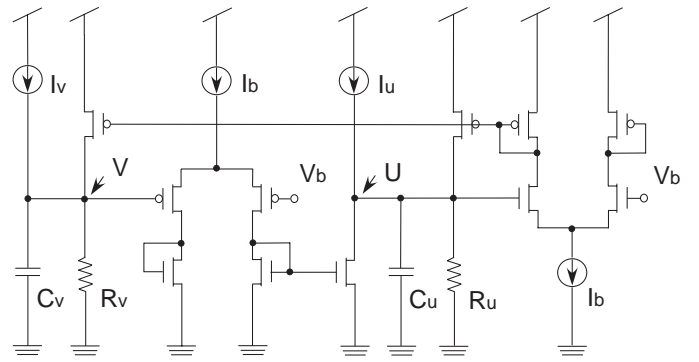


図 10 神経振動子回路

神経回路に入力される電流 $A \cdot I_\mu(u)$ に相対的に近づければ良い．ただし， $B \cdot I_\mu(u)$ が変化することにより $u-v$ 相平面における平衡点がずれるため，バイアス電流 $I_v(t)$ を調節して平衡点を補正する必要がある．

4.2 ネットワーク構成

複数の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，まず以下のように (3)-(7) の各パラメータを物理量に置き換える：

$$\begin{aligned} C_u \dot{u}^{\{0,1,2,3\}} = & -\frac{u^{\{0,1,2,3\}}}{R_u} + A I_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + A_w I_\mu(u_w^{\{2,3,1,0\}}) + A_g I_\mu(u_g^{\{2,0,3,1\}}) \\ & - C_{lr} I_\mu(v^{\{1,0,3,2\}}) - C_{fh} I_\mu(v^{\{2,3,0,1\}}) \\ & - C I_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) + I_u^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_v \dot{v}^{\{0,1,2,3\}} = & -\frac{v^{\{0,1,2,3\}}}{R_v} + B f_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) \\ & - D_t I_\mu(v_t^{\{3,2,1,0\}}) + I_v^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} C_{uw} \dot{u}_w^{\{0,1,2,3\}} = & -\frac{u_w^{\{0,1,2,3\}}}{R_{uw}} + A_w I_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{uw}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} C_{ug} \dot{u}_g^{\{0,1,2,3\}} = & -\frac{u_g^{\{0,1,2,3\}}}{R_{ug}} + A_g I_\mu(u^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{ug}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C_{vt} \dot{v}_t^{\{0,1,2,3\}} = & -\frac{v_t^{\{0,1,2,3\}}}{R_{vt}} - D_t I_\mu(v^{\{0,1,2,3\}}) \\ & + I_{vt}^{\{0,1,2,3\}} + I_{xt}^{\{0,1,2,3\}} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで, C_u, C_v, C_{uw}, C_{ug} および C_{vt} は各容量の値, R_u, R_v, R_{uw}, R_{ug} および R_{vt} は各抵抗の値を表し, (3)-(7)における時定数 $\tau_u, \tau_v, \tau_{uw}, \tau_{ug}$ および τ_{vt} に, $C_u \cdot R_u, C_v \cdot R_v, C_{uw} \cdot R_{uw}, C_{ug} \cdot R_{ug}$ および $C_{vt} \cdot R_{vt}$ がそれぞれ対応している. また, $A, A_w, A_g, B, C, C_{lr}, C_{fh}$ および D_t は各結合係数であり, 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, $I_{\mu}(\cdot)$ は差動対の出力電流, $I_u, I_v, I_{uw}, I_{ug}, I_{vt}$ および I_{xt} は各制御電流を表している.

5. 実験結果

提案回路の基本動作を確認するために, SPICE による回路シミュレーションを行った. 以下の実験では, MOSIS AMIS 1.5- μm CMOS デバイスパラメータを用い, PSPICE によるシミュレーションを行った. また, 実験全体を通して, 共通のパラメータとして,

$$A = C = 4.0, B = 3.0, C_{lr} = C_{fh} = 1.0$$

に設定した. また, 各抵抗および容量の値をそれぞれ

$$C_u = C_v = C_{ug} = C_{vt} = 100 \text{ nF}, C_{uw} = 300 \text{ nF}$$

$$R_u = R_v = R_{uw} = R_{ug} = R_{vt} = 1 \text{ M}\Omega$$

とした. また, 電源電圧 $V_{DD} = 3.0 \text{ V}$, 各差動対のバイアス電圧およびバイアス電流は $V_b = 1.0 \text{ V}$, $I_b = 100 \text{ nA}$ とした.

5.1 各振動パターンの生成

はじめに, 各歩容に対応した振動パターンの生成を確認した. まず, Walk に対応した振動パターンを生成するために, 結合係数を次のように設定した:

$$A_w = 3.0, A_g = D_t = 0.0.$$

また, バイアス電流を次のように設定した: $I_u, I_v, I_{uw}, I_{ug}, I_{vt} = (0.95, 0.85, 0.85, 1.0, 1.0) \mu\text{A}$, $I_{xt\{k\}} = 0 \text{ A}$, ($k = 0, 1, 2, 3$).

次に, Trot に対応した振動パターンを生成するために, 結合係数を次のように設定した:

$$D_t = 1.0, A_w = A_g = 0.0.$$

また, バイアス電流を次のように設定した: $I_u, I_v, I_{uw}, I_{ug}, I_{vt} = (1.1, 0.9, 1.0, 1.0, 1.05) \mu\text{A}$, $I_{xt\{0\}} = I_{xt\{3\}} = 2 \text{ nA}$, $I_{xt\{1\}} = I_{xt\{2\}} = 0 \text{ A}$.

さらに, Gallop に対応した振動パターンを生成するために, 結合係数を次のように設定した:

$$A_g = 2.0, A_w = D_t = 0.0.$$

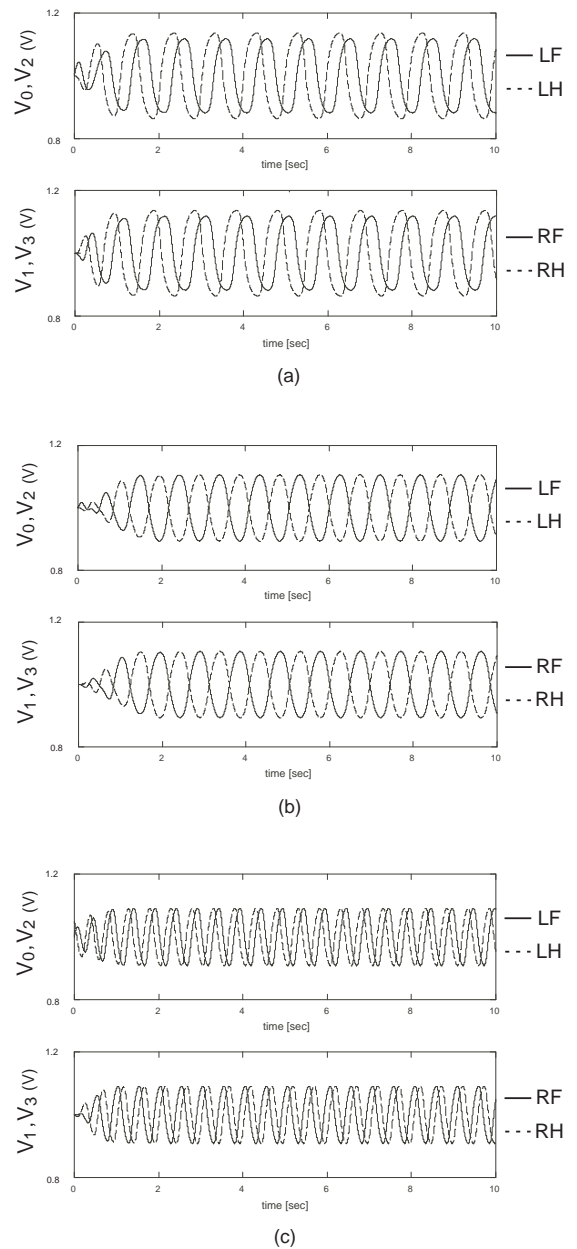


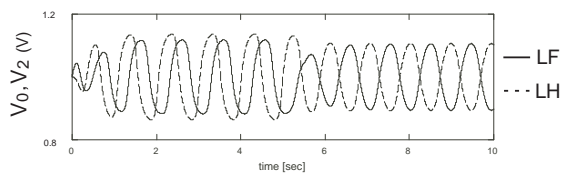
図 11 振動パターンの生成. (a) Walk mode. (b) Trot mode. (c) Gallop mode.

また, バイアス電流を以下のように設定した: $I_u, I_v, I_{uw}, I_{ug}, I_{vt} = (1.0, 0.85, 1.0, 0.9, 1.0) \mu\text{A}$, $I_{xt\{k\}} = 0 \text{ A}$, ($k = 0, 1, 2, 3$).

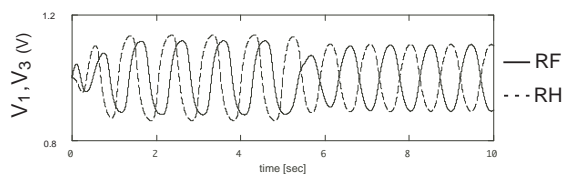
以上の結果を図 11(a)~(c) に示す. それぞれの振動パターンにおいて, 各歩容を特徴付ける位相差が保たれていることが確認できた.

5.2 振動パターンの移行

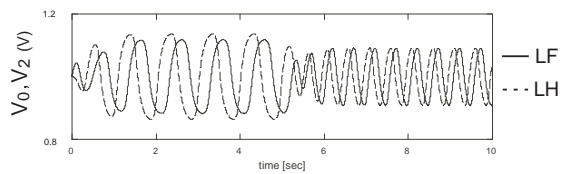
次に, 各歩容に対応した振動パターン間の移行について調べた. 各振動モードにおいて, 振動が開始されてから 5.0 s 後に, 結合係数およびバイアス電流を緩やかに切り替えた. その結果, 振動モードから



(a)

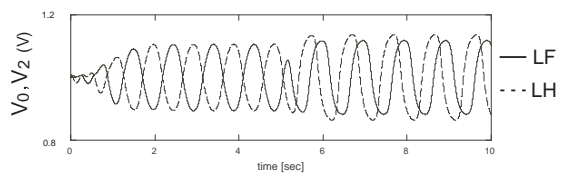


(b)

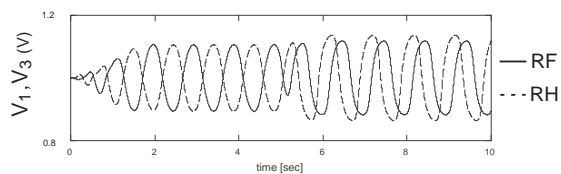


(c)

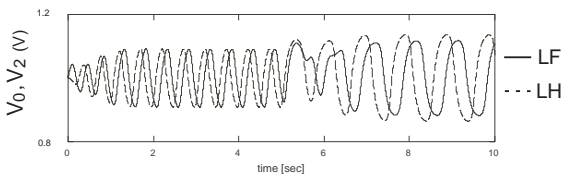
図 12 振動パターンの移行 I . (a) Walk to Trot. (b) Walk to Gallop. (C) Trot to Gallop.



(a)



(b)



(c)

図 13 振動パターンの移行 II . (a) Trot to Walk. (b) Gallop to Walk. (c) Gallop to Trot.

振動モードへの速やかな移行を確認することができた．その結果を図 12 および図 13 に示す．

5.3 振動周波数の調整

次に，振動周波数の調整について確認した．4.1 で述べたように振動周波数を調整するためには， $u-v$ 相空間におけるリミットサイクルの軌道を制御すれば良い．ここでは，Trot モードにおいて差動対からの出力電流 $B \cdot I_\mu(u)$ とバイアス電流 I_v を調節することで振動周波数の制御を行った．まず， $I_\mu(u) = 80 \text{ nA}$ ， $I_v = 0.93 \text{ } \mu\text{A}$ としたときの振動周波数を調べた．次に， $I_\mu(u) = 120 \text{ nA}$ ， $I_v = 0.87 \text{ } \mu\text{A}$ としたときの振

動周波数を調べた．その結果，振動周波数の変化を確認することができた（図 14）．

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 をアナログ回路化したものとしては，G. Patel [9] や M. A. Lewis [10] によるものがある．しかし，これらの研究では生成できる振動パターンや振動パターン間の移行に関して不十分な

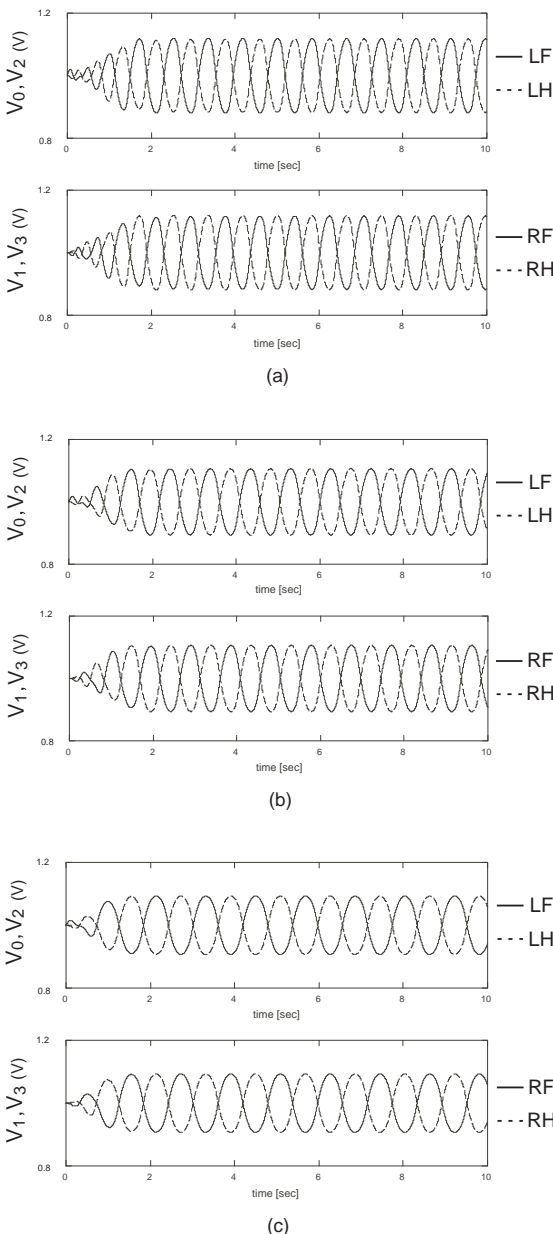


図 14 振動周波数の調整

点があった．そこで本研究では，相互抑制結合した結合振動子に対称構造と介在ユニット [11] , [12] を導入し，よりパターン生成能力の高い CPG 回路を構成した．提案回路は，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．この結果，長時間稼働が期待できる．また，回路を構成する MOS FET が少なくすむ（高々二桁程度）ため，省面積が実現できる．提案回路の基本動作を確認するため，SPICE による回路シミュレーションを行った結果，複数の振動パターンの生成と振動パターン間の速やかな移行を確認することができた．以上の結果より，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ことができた．

謝 辞

本研究は，平成 12 年度 NEDO 速効型産業技術研究事業費助成金および平成 14 年度科学研究費補助金若手研究 B（課題番号:13750295）を受けて研究を実施したものです．

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] J. Nishii, "Legged animals select the optimal locomotor pattern based on energetic cost," *Biological Cybernetics.*, vol.83, pp.435-442, 2000.
- [4] K. Matsuoka, "Mechanism of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biological Cybernetics.*, 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," *Biological Cybernetics.*, vol. 65, pp.147-159, 1991.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] J. Shan, F. Nagashima, "Biologically Inspired Spinal Locomotion Controller for Humanoid Robot," 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, pp.517-518, 2001 .
- [9] G. Patel, J. Hollemam and S. Deweerth, "Analog VLSI Model of Intersegmental Coordination with Nearest Neighbor Coupling," In *Adv. Neural Information Processing.*, vol. 10, pp.710-725, 1998.
- [10] 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.
- [11] 竹村 裕, 松本 吉央, 今井 正和, 小笠原司, "リズム生成に基づく歩行ロボットの跨ぎ越え行動の生成," 第 18 回ロボット学会学術講演会, pp.211-212, 2000.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 辻 茂樹, 上田 哲史, 川上 博, 合原 一幸, "周期外力を付加した Amari-Hopfield ニューロン対におけるバースト応答の分岐," 電気学会論文誌, vol.1-c, NO.9, pp.1506-1514, 2002.
- [15] C. A. Mead, *Analog VLSI and Neural Systems*, Reading, Mass, Addison-Wesley, 1989.