

インパルス無線で結合されたCPGの解析とロボット制御への応用について

KUDO, Masaya / 工藤, 雅也

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030696>

インパルス無線で結合された CPG の解析とロボット制御への応用について

ANALYSIS OF A CPG COUPLED VIA IMPULSE RADIO SEQUENCES AND ITS APPLICATION TO ROBOT CONTROL

工藤雅也

Masaya KUDO

指導教員 鳥飼弘幸

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

We design a network of four ergodic cellular automaton (CA) oscillators coupled by impulse radio (IR) sequences based on a wireless central pattern generator (CPG). We implement the network by using a field programmable gate array (FPGA), and experiments result that the network is able to show in-phase synchronization. Then, it is discussed how the results of this paper will contribute to the development of a wireless walk support device based on a wireless CPG.

Key Words : Central pattern Generator(CPG), Field programmable gate array (FPGA)

1. はじめに

近年、様々な歩行アシストデバイスが開発されている[1][2][3]。例えば、図1(a)は上位運動ニューロンの損傷による下垂足の治療用電気刺激デバイスの概念図である[2]。このデバイスは患者の適切な歩行を補助するために片足の筋肉を刺激する。しかし、ニューロンの損傷がより深刻な場合、より多くの筋肉を適切に刺激しなければならない。例えば、運動ニューロンが重篤な損傷を受けている患者を正しく歩行させるためには、全身の多くの筋肉を適切な位相差をもったリズムカルな電気信号をもって刺激する必要がある。ところで、人間を含む多くの生物において、そのようなリズムカルな信号は神経系の中核パターン発生器 (Central Pattern Generator: CPG) で生成されていると考えられている[4]。よって、本研究では、図1(b)に示すような CPG を基にした電気刺激医療デバイスの構想に着目する。患者の歩行を邪魔しないように、発振器等の CPG の各部位は無線信号で結合されるべきである。したがって、本研究はインパルス無線系列[5][6]で結合された発振器のネットワークを設計し、同期現象を解析する[7][8][9][10]。

2. インパルス無線系列で結合されたエルゴード的順序回路発振器のネットワーク

(1) インパルス無線系列

ネットワークの第 i 番目発振器は次に示すような拡散符号 $C^{(i)}$ を持つ。

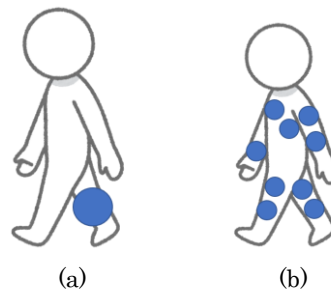


図1 (a) 上位運動ニューロンの損傷による下垂足の治療用電気刺激デバイスの概念図[2]。 (b) CPG を基にした電気刺激医療デバイスの概念図。

$$C^{(i)} = (C_1^{(i)}, C_2^{(i)}, \dots, C_L^{(i)}), C_l^{(i)} \in \{0,1\}$$

ここで、 L は符号長であり、 K は符号内の 1 の数であり、それは符号長 L に対して十分小さいとする。符号がインパルスであり、主に無線通用に設計されているため、このような拡散符号はインパルス無線系列とも呼ばれている[5][6]。基本的な符号分割多重方式と同様に、インパルス無線系列は自己相関関数、相互相関関数共に十分に低い値をとるように設計する。

(2) エルゴード的順序回路発振器

本ネットワークの発振器として、エルゴード的順序回路発振器を用いる[11]。その発振器には 4 つのレジスタがあり、そのレジスタは次のように定められる離散状態変数 P_i 、 Q_i と離散補助変数 X_i 、 Y_i を保存する。

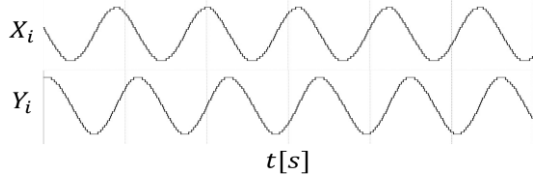


図2 エルゴード的順序回路発振器の典型的な時間波形. $(N, M, \alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}, \beta_x, \beta_y, \omega, T_{Ci}, T_{Xi}, \Phi_{Xi}, W_{Xi}, T_{Yi}, \Phi_{Yi}, W_{Yi}) = (2^6, 2^5, 1, 1, 1, 1, 2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-2} T_{Yi}, 2\pi \times 10^2, 10^{-3}, 10^{-3}, 0, 10^{-3}, 1.12\sqrt{1.0001} \times 10^{-3}, 0.8 \times 10^{-4})$.

$$X_i \in Z_M = \{0, \dots, M-1\}, Y_i \in Z_M, \\ P_i \in Z_N = \{0, \dots, N-1\}, Q_i \in Z_N,$$

ここで、 i はネットワークの発振器の番号であり、 $M > 0$ と $N > 0$ は整数パラメータであり、それぞれ $\{P_i, Q_i\}, \{X_i, Y_i\}$ の解像度を定める。そして、それらの変数はとり得る最小値と最大値で飽和する。また、エルゴード的順序回路発振器は次のような周期クロックを受け取る。

$$CLK_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p(t - nT_{Ci}).$$

ここで、 $p(t)$ は $p(t) = 1$ if $t = 0$, $p(t) = 0$ if $t \neq 0$ で定義される瞬間パルスであり、 $T_{Ci} > 0$ はクロック CLK_i の周期である。加えて、発振器は二つのバイナリスイッチ信号 $SW_{Xi}(t) \in \{0, 1\}$ と $SW_{Yi}(t) \in \{0, 1\}$ を受け取る。本研究ではスイッチ信号 $SW_{Xi}(t)$ と $SW_{Yi}(t)$ は次のように定義される。

$$SW_{Xi}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Xi} - \Phi_{Xi}, W_{Xi}), \\ SW_{Yi}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Yi} - \Phi_{Yi}, W_{Yi}),$$

ここで、 $q(t, W)$ は $q(t) = 1$ if $t \in [0, W]$, $q(t) = 0$ if $t \notin [0, W]$ で定義されるパルスであり、 $T_{Xi} > 0$ と $T_{Yi} > 0$ は周期であり、 $W_{Xi} \in [0, T_{Xi}]$ と $W_{Yi} \in [0, T_{Yi}]$ はパルス幅であり、 $\Phi_{Xi} \in [0, T_{Xi}]$ と $\Phi_{Yi} \in [0, T_{Yi}]$ は初期位相である。そして、クロック CLK_i は離散状態変数 X_i と Y_i の次のような遷移を引き起こす。

If $CLK_i(t) = \uparrow$, then

$$X_i(t^+) = X_i(t) + S_{Xi}(t) F_X(X_i(t), Y_i(t), P_i(t)), \\ Y_i(t^+) = Y_i(t) + S_{Yi}(t) F_Y(X_i(t), Y_i(t), Q_i(t)).$$

ここで、 $t^+ = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} t + \epsilon$, $\epsilon > 0$ であり、 $F_X: Z_N^2 \times Z_M \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ と $F_Y: Z_N^2 \times Z_M \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ は発振器の非線形ベクトル場を決定する離散関数である。発振器を CPG の構成要素として使うため、その離散ベクトル場関数は次のように定義される。

$$F_X(X, Y, P) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_X(X, Y) \geq 0 \text{ and } P \geq |F_X(X, Y)|, \\ -1 & \text{if } F_X(X, Y) < 0 \text{ and } P \geq |F_X(X, Y)|, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \\ F_Y(X, Y, Q) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_Y(X, Y) \geq 0 \text{ and } Q \geq |F_Y(X, Y)|, \\ -1 & \text{if } F_Y(X, Y) < 0 \text{ and } Q \geq |F_Y(X, Y)|, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

ここで、 $F_X: Z_N^2 \rightarrow Z_M^{\pm} = \{-(M-1), -(M-2), \dots, M-1\}$ と $F_Y: Z_N^2 \rightarrow Z_M^{\pm}$ は $F_X(X, Y) = \left[(\beta_x f_x(\alpha_{xx}(X - K), \alpha_{xy}(Y - K)))^{-1} \right]$, $F_Y(X, Y) = \left[(\beta_y f_y(\alpha_{yx}(X -$

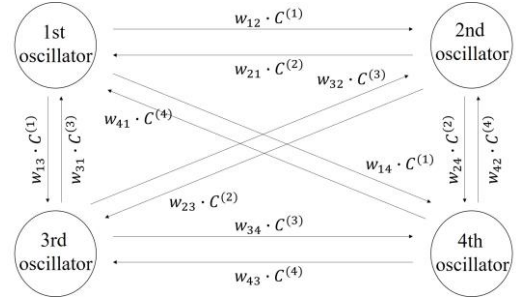


図3 インパルス無線系列による発振器の結合。

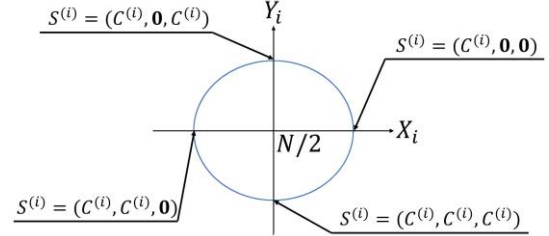


図4 第 i 番目の発振器の位相と送信信号 $S^{(i)}$ 。

$K), \alpha_y(Y - K))^{-1} \right]$, $f_x(x, y) = \delta x - \omega y - x(x^2 + y^2)$, $f_y(x, y) = \omega x + \delta y - y(x^2 + y^2)$, $K = N/2$ で与えられる離散関数であり、 $[\cdot]$ は床関数であり、 F_X と F_Y は $\pm(M-1)$ で飽和し、 $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}, \beta_x, \beta_y$ は正のスケールリングパラメータであり、 $\delta \in \mathbf{R}$ と $\omega > 0$ は非線形性を決める。離散補助変数 P_i と Q_i は次のように状態依存の分周期として動作する。

If $CLK_j(t) = \uparrow$ and $S_{Xj}(t) = \text{ON}$, then

$$P_j(t^+) = \begin{cases} P_j(t) + 1 & \text{if } F_X(X_j(t), Y_j(t), P_j(t)) = 0, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

If $CLK_j(t) = \uparrow$ and $S_{Yj}(t) = \text{ON}$, then

$$Q_j(t^+) = \begin{cases} Q_j(t) + 1 & \text{if } F_Y(X_j(t), Y_j(t), Q_j(t)) = 0, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

図2 はエルゴード的順序回路発振器の典型的な時間波形を示す。

(3) インパルス無線系列による結合

図3 はインパルス無線系列で結合された4つのエルゴード的順序回路発振器のネットワークの構成を示す。 X_i が $\lfloor (N-1)/2 \rfloor$ に近づいたときと Y_i が $\lfloor (N-1)/2 \rfloor$ に近づいたとき、それぞれ、各発振器は自身の位相に対応した図4に示すような信号 $S^{(i)}$ を他の全ての発振器に送信する。

ただし、 $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)$ であり、拡散符号 $C^{(i)}$ の符号長 L と同じ長さを持つ。そして、適切な逆拡散回路を用いることで、各発振器は信号 $S^{(i)}$ が送信された瞬間を検知できる。この検知機能を基にして、次のような発振器の結合法を設計する。 $w_{ij} \in \{-1, 0, 1\}$ は結合重みである。

第 j 番目の発振器と第 i 番目の発振器の結合法:

第 j 番目発振器が第 i 番目発振器からのインパルス無線系列 $S^{(i)} = (C^{(i)}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$ を受信し、 $w_{ij} = 1$, $X_j > \lfloor (N-1)/2 \rfloor$ のとき、第 j 番目発振器のクロック周期 T_j を $T_j + \Delta_j$ に変化させる。ただし、 $\Delta_j = k(Y_j - \lfloor (N-1)/2 \rfloor)$ であり、 $k >$

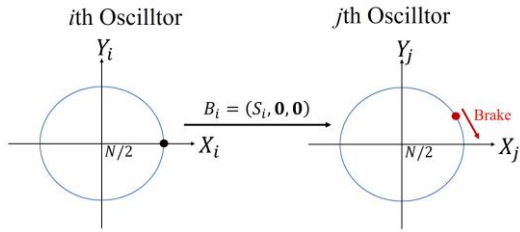


図5 第 j 番目の発振器からの信号 $S^{(j)} = (C^{(j)}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$ 受け取った第 i 番目の発振器のクロックの動作 ($Y_j > [(N-1)/2]$ の場合).

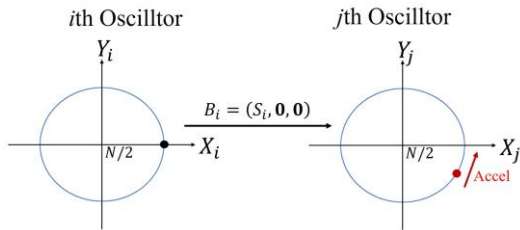


図6 第 j 番目の発振器からの信号 $S^{(j)} = (C^{(j)}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$ 受け取った第 i 番目の発振器のクロックの動作 ($Y_j < [(N-1)/2]$ の場合).

0 である[9]. このとき, $Y_j > [(N-1)/2]$ であれば, 図5のようにクロックは遅くなり第 j 番目と第 i 番目の発振器の位相が同期する. また, $Y_j < [(N-1)/2]$ であれば, 図6のようにクロック速くなり第 j 番目と第 i 番目の発振器の位相が同期する. 他3種のインパルス無線系列を受信した場合も同様にしてクロックが変化して第 j 番目と第 i 番目の発振器の位相が同期する.

3. FPGA 実装と無線結合

本研究では, 特定小電力無線モジュールを用いて4つの発振器のネットワーク実装した. 結合重み w_{ij} を調整することで, このネットワークは様々な同期を実現できる. このネットワークは2つのFPGAを用いて実装し, 図7に示すように各FPGAに2つの発振器を実装した. 図8に実験結果を示す. 図8は結合重み $w_{ij} = 1$ であり, 同相同期を示す. また, 結合重み w_{ij} を調整することで他の位相同期も実現した.

4. まとめ

本研究では, インパルス無線系列で結合されたエルゴード的順序回路発振器の提案ネットワークをFPGAと無線送信機と無線受信機で実装した. また, 実験で4つのエルゴード的順序回路発振器のネットワークが同相同期できることを示した. 多重インパルス無線系列によるネットワークの規模拡張と提案結合法を拡張することでネットワークが様々な位相差を実現できることを確認した. したがって, 本研究の成果は無線CPGを基にした無線歩行アシストデバイスの発展に貢献するものである. 今後の課題としては, (a) 他の位相差を持つ結合発振器の実装, (b) 無線歩行装置のためのより大きなネットワークの設

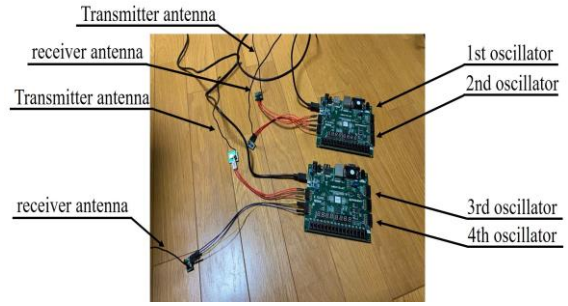


図7 実験準備

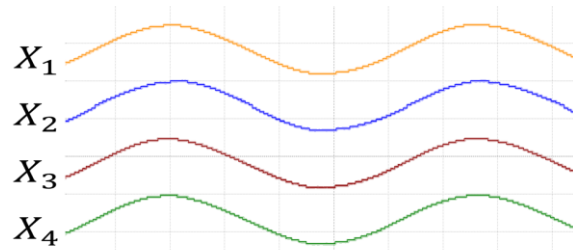


図8 FPGAで実装した提案ネットワークの時間波形 [10]. ただし, クロックシフトパラメータ $k = 0.0001$, 結合重み $w_{ij} = 1$ であり, 他パラメータは図

計, (c) 最適なクロックシフトパラメータ k の探索, などが挙げられる.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 研究の内容, 方針についてご丁寧な指導を受け賜りました鳥飼弘幸教授には心より深く感謝いたします.

参考文献

- 1) K. Takeda, G. Tanino, H. Miyasaka, Review of devices used in neuromuscular electrical stimulation for stroke rehabilitation, Medical Devices: Evidence and Research, vol 10, pp. 207-213, 2017.
- 2) <https://medical.teijin-pharma.co.jp/zaitaku/product/walkaide/>
- 3) <https://www.og-wellness.jp/product/medical/gd611-612>
- 4) E. R. Kandel et. al., Principles of Neural Science, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2021.
- 5) W. Chu and C. J. Colbourn, Sequence designs for ultra-wideband impulse radio with optimal correlation properties, IEEE Trans. Information Theory, vol.50, no.10, pp. 2402-2407, 2004.
- 6) T. Iguchi, A. Hirata, and H. Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-pattern-division multiplexing,
- 7) M. Kudo and H. Torikai, Synchronizations of Hopf Oscillators Coupled via Impulse Radio Sequences: A fundamental research towards designing wireless electrical stimulation therapy device, Proc. of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, pp. 76-78, 2021.
- 8) M. Kudo and H. Torikai, A novel hardware efficient wireless

walking assist device model and analyses of its various synchronization phenomena, Proc. of NOLTA, pp. 495-498, 2022.

- 9) M. Kudo and H. Torikai, A hardware-efficient wireless functional electrical stimulation system based on ergodic cellular automaton dynamics, Proc. of ISOCC, 2023.
- 10) 工藤, 鳥飼, エルゴード的順序回路 CPG を用いた無線歩行アシストデバイスの基礎解析, 電子情報通信学会信学技報, NLP2023-34, 2023.
- 11) S. Komaki, K. Takeda, H. Torikai, A Novel Ergodic Discrete Difference Equation Model of Central Pattern Generator: Theoretical Analysis and Efficient Implementation, IEEE Trans. Circuits Syst. II, vol. 69, pp. 1767-1771, 2021.