法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

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ミ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、そのようなリズミカルな信号は神経系の中枢 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].

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.

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

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.



 $\mathbb{E} \left\{ \begin{array}{l} \mathbb{E} \left\{ 2 \times 10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-2} T_{Yi}, \Phi_{Yi}, W_{Yi} \right\} = \left(2^{6}, 2^{5}, 1, 1, 1, 1, 2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-2} T_{Yi}, 2\pi \times 10^{2}, 10^{-3}, 10^{-3}, 0, 10^{-3}, 1.12 \sqrt{1.0001} \times 10^{-3}, 0.8 \times 10^{-4} \right\}.$

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

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 $\{P_i, Q_i\}$, $\{X_i, Y_i\}$,の解像度を決める.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, $T_{Xi} > 0 \ge T_{Yi} > 0$ は 周期であり, $W_{Xi} \in [0, T_{Xi}] \ge W_{Yi} \in [0, T_{Yi}]$ はパルス幅 であり, $\Phi_{Xi} \in [0, T_{Xi}] \ge \Phi_{Yi} \in [0, T_{Yi}]$ は初期位相である. そして, クロック*CLK_i* は離散状態変数 $X_i \ge Y_i$ 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, $t^+ = \lim_{\epsilon \to 0} t + \epsilon$, $\epsilon > 0$ であり, $F_X: \mathbb{Z}_N^2 \times \mathbb{Z}_M \rightarrow$ $\{-1,0,1\} \geq F_Y: \mathbb{Z}_N^2 \times \mathbb{Z}_M \rightarrow \{-1,0,1\}$ 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.

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

 $\begin{array}{l} \mathbb{L} \subset \mathbb{C}, \quad F_X \colon \ \boldsymbol{Z}_N^2 \to \boldsymbol{Z}_M^{\pm} = \{-(M-1), -(M-2), \cdots, M-1\} \\ \mathbb{L} \quad F_Y \quad : \quad \boldsymbol{Z}_N^2 \to \boldsymbol{Z}_M^{\pm} \quad \text{it} \quad F_X(X,Y) = \left\lfloor (\beta_x f_x \left(\alpha_{xx} (X-K), \alpha_{xy} (Y-K) \right) \right)^{-1} \right\rfloor, F_Y(X,Y) = \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yx} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right)^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor, F_Y(X,Y) = \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K), \alpha_{yy} (Y-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} \right\rfloor + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy} (X-K) \right) \right\rfloor^{-1} + \left\lfloor (\beta_y f_y \left(\alpha_{yy$



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, $f_x(x, y) = \delta x - \omega y - x(x^2 + y^2)$, $f_y(x, y) = \omega x + \delta y - y(x^2 + y^2)$, K = N/2 で与えら れる離散関数であり, [·] は床関数であり, $F_X \ge F_Y$ は ±(M - 1) で飽和し, $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}, \beta_x, \beta_y$ は正のスケ ーリングパラメータであり, $\delta \in \mathbb{R} \ge \omega > 0$ は非線形性 を決める. 離散補助変数 $P_i \ge Q_i$ 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 $S_{Xj}(t) = ON$, then

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

If
$$CLK_j(t) = \uparrow$$
 and $S_{Yj}(t) = ON$, 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、**0** = (0,0,…,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 $S^{(i)} = (C^{(i)}, 0, 0)$ 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 >





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 8 FI GA (実装 した 捉菜 ホ ク ト ク ー ク の 時間 仮 [10]. ただし、ク ロックシフトパラメータk = 0.0001,結合重 $A w_{ii} = 1$ 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

- 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.
- https://medical.teijinpharma.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.
- W. Chu and C. J. Colbourn, Sequence designs for ultrawideband 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 phenomina, 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.