

## Timing Drift-Diffusionモデルを組み込んだ Rescorla-Wagnerモデルにおける古典的条件 付けのハードウェア実装

UJIFUKU, Ryota / 氏福, 亮太

---

(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)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

3

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026332>

# Timing Drift-Diffusion モデルを組み込んだ Rescorla-Wagner モデルにおける 古典的条件付けのハードウェア実装

Hardware Implementation of Classical Conditioning  
of Rescorla-Wagner Model with Timing Drift-Diffusion Model

氏福 亮太

Ryota UJIFUKU

指導教員 鳥飼弘幸 教授

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A novel hardware-efficient neuronal network having conditioning functions is proposed, where its nonlinear dynamics is designed based on ergodic cellular automaton. The proposed network is implemented by an FPGA and experiments validate its conditioning functions. It is shown that the network can be implemented by fewer circuit elements and consumes lower power than a conventional conditioning model.

**Key Words** : classical conditioning, circuit elements

## 1. はじめに

古典的条件付けとは、ある生物に CS (条件刺激) や US (無条件刺激) などの刺激を繰り返し対呈示すること (条件付け) によって、CR (条件反応) が変化する理論である。計算論における古典条件付けで起こる現象を説明するモデルとして Rescorla-Wagner モデル [1] が挙げられる。

$$\Delta V_i(n) = \alpha_i \beta_k \left( \lambda - \sum_{j=1}^l V_j(n) \right). \quad (1)$$

本稿は、上述したものを含んだ複数の古典的条件付けの現象を再現するモデルとして Timing Drift-Diffusion モデル (TDDM)[2][3]を組み込んだ Rescorla-Wagner モデル (RWDDM)[4] について調査を行う。同モデルを Field Programmable Gate Array (FPGA) に実装する手法を検討する。

## 2. Timing Drift-Diffusion モデル (TDDM) を組み込んだ Rescorla-Wagner モデル (RWDDM)

RWDDM では、詳細な時間関係や再獲得などの現象を再現することができる。RWDDM の結合強度変化率の式は以下の式で構成されている。

$$\Delta V_i(n) = \alpha_i \beta_k \left( \lambda - \sum_{j=1}^l V_j(n) x_j(n) \right) x_j(n). \quad (2)$$

$x_i$  は試行  $n$  での  $CS_i$  の存在を表現するものであり、不在の時は  $x_i = 0$  と表現される。また、図 1 に示されているようにこのモデルには独自のタイマーがあり、以下の式で表現される。

$$\Delta \Psi_i(t) = A_i(n) \cdot \Delta t + m \cdot \sqrt{A_i(n) \cdot \Delta t} \cdot \mathcal{N}(0,1). \quad (3)$$

$$\Delta A_i(n) = \alpha_t A_i(n) \frac{(\theta - \Psi_i(t^*))}{\Psi_i(t^*)}. \quad (4)$$

ここで、 $A_i(n)$  は試行  $n$  における  $CS_i$  の累積率 (勾配)、 $m$  はノイズ係数、 $\mathcal{N}(0,1)$  は標準正規分布からサンプリングを示す。 $\theta$  は  $\Psi_i$  における閾値である。 $t^*$  は、CS に入力された時間を示す。RW モデルで使用されていた存在表現  $x$  はタイマーを用いてガウスで置き換えた表現とする。

$$x_i(\Psi_i) = \exp\left(-\frac{(\Psi_i(t) - \theta)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

式 (2)、式 (3)、式 (4)、式 (5) から、CS の入力時間で  $1 = A \cdot t^*$  になるよう、徐々に適応することが読み取れる。

RWDDM の  $\lambda$  は以下の式で表せる.

$$\lambda = \frac{HA_i(n)}{\Psi_i(t^*)}. \quad (6)$$

CS<sub>i</sub> のリアルタイム応答 CR<sub>i</sub> は, 結合強度と表現の積である.

$$CR_i(t) = V_i(n)x_i(\Psi_i). \quad (7)$$

以上の式で RWDDM が構成される.

### 3. RWDDM のハードウェア実装

#### (1) エルゴードセルオートマトンを用いた RWDDM

RWDDM のハードウェア実装において, エルゴードセルオートマトンを用いた RWDDM を提案する. このモデルは, 整数型状態変数である, タイマー  $X_i(t)$  とタイマーの勾配  $Y_i(t)$  と状態依存分周期  $P_i(t)$ ,  $Q_i(t)$  持つ.

$$X_i(t) \in Z_N = \{0, 1, \dots, N-1\}, Y_i(t) \in Z_N. \quad (8)$$

$$P_i(t) \in Z_M = \{0, 1, \dots, M-1\}, Q_i(t) \in Z_M. \quad (9)$$

$i$  は, モデルに入力される CS の番号である. また  $N$  と  $M$  は離散変数の解析度を決定する自然数である. 非線形ベクトルを設計するために, ベクトル場関数  $F_X(Y_i(t)) \in Z_N$ ,  $F_Y(X_i(t), Y_i(t)) \in Z_M$  をもつ.

$$F_X(Y_i(t)) = \text{int} \left( \frac{l}{f_X(Y_i(t)) \cdot T_X} \right). \quad (10)$$

$$f_X(Y_i(t)) = l \cdot Y_i(t). \quad (11)$$

$$F_Y(X_i(t), Y_i(t)) = \text{Int} \left( \frac{1}{f_Y(X_i(t), Y_i(t)) \cdot T_X} \right). \quad (12)$$

$$f_Y(X_i(t), Y_i(t)) = \alpha_t l^2 \left( \frac{\theta - l(X_i^* - N/2)}{l(X_i^* - N/2)} \right) \quad (13)$$

$$X_i^* = X_i(t^*). \quad (10)$$

$t^*$  は CS が入力された時間を示す. 次に整数型状態変数の遷移式をしめす.

$$\text{If } C_{CS}(t) = \text{negedge}, X_i(t) = N/2. \quad (11)$$

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_X(t) = 1$ ,

$$X_i(t^+) = \begin{cases} X_i(t) + F_X(Y_i(t)) & \text{if } P_i(t) > F_X(Y_i(t)), \\ X_i(t) & \text{if } P_i(t) = F_X(Y_i(t)), \\ X_i(t) - F_X(Y_i(t)) & \text{if } P_i(t) < F_X(Y_i(t)), \end{cases} \quad (12)$$

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_Y(t) = 1$ ,

$$Y_i(t^+) = \begin{cases} Y_i(t) + f_Y(X_i(t), Y_i(t)) & \text{if } Q_i(t) > f_Y(X_i(t), Y_i(t)), \\ Y_i(t) & \text{if } Q_i(t) = f_Y(X_i(t), Y_i(t)), \\ Y_i(t) - f_Y(X_i(t), Y_i(t)) & \text{if } Q_i(t) < f_Y(X_i(t), Y_i(t)), \end{cases} \quad (13)$$

スイッチ信号に加え, 状態依存分周期によって整数型状態変数の遷移する. 次に状態依存分周期の遷移式をしめす.

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_X(t) = 1$ ,

$$P_i(t^+) = \begin{cases} P_i(t) + 1 & \text{if } P_i(t) \geq F_X(Y_i(t)), \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (14)$$

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_Y(t) = 1$ ,

$$Q_i(t^+) = \begin{cases} Q_i(t) + 1 & \text{if } Q_i(t) \geq f_Y(X_i(t), Y_i(t)), \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (14)$$

以上の式で提案モデルは構成される. 図 1 に遷移図を示す.

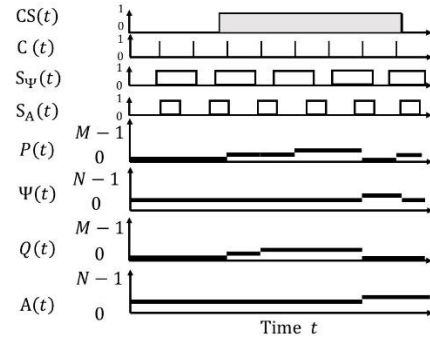


図 1 エルゴードセルオートマトン RWDDM 遷移図

#### (2) 実装結果

提案したモデルをハードウェア記述言語である Verilog-HDL を用いて, Xilinx 社の Vivado 2020.2 でコンパイルを行なった. また, 実機として Xilinx 社の FPGA デバイス xc7a100tgc324-1 を用いて実装を行った. 提案モデルの獲得, 消去, 再獲得の実装波形を図 2 に示す. また, 前進オイラー法を用いた数値演算モデルを同様に実装した. 表 1 に比較結果を示す. 提案モデルは, 数値演算モデルと比べ LoopUp Table は約 40%, Flip-Flop は約 67% に削減できることを確認出来た.

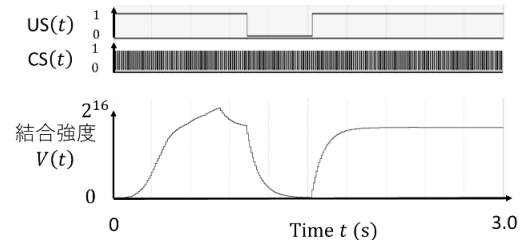


図 2 提案モデルの条件付け (獲得, 消去, 再獲得)

表 1 モデル比較

	Proposed model		RWDDM based on numerical calculation
	Integer variables	Fixed point number variables	Fixed point number variables
variables	Integer variables	8	28
	Fixed point number variables	28	
Bit width	15107		37672
LookUp Table	326		496
Flip-Flop			

#### 4. 結論

本稿では、RWDDM の実装方法について提案を行い、古典的条件付けを実行した。また、提案モデルと数値演算モデルの使用素子の比較を行い、提案モデルは回路素子数が少なく、低消費電力も低いというハードウェア効率の良いことが確認できた。

**謝辞:** 本研究において、コロナ禍にもかかわらず法政大学理工学部の鳥飼弘幸教授には方針や内容、器具の用意などご高配に預かり、厚く御礼申し上げます。また、鳥飼研究室の皆様には研究進行においてお力添えをいただきました。心より感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Rescorla, R. A. and Wagner, A. R., A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In: Black, A. H. and Prokasy, W. F., editors. *Classical Conditioning II : Current Research and Theory*, vol. 21, Appleton-Century-Crofts, 64–99, 1972. Yamada, Y. et al. : Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elasto-plastic problems by a finite element method, *Int. J. of Mechanical Science*, Vol.10, pp.343-354, 2008
- 2) Rivest, F. and Bengio, Y., Adaptive Drift-Diffusion Process to Learn Time Intervals, Arxiv preprint arXiv:11032382, 2011.
- 3) Simen, P., Balci, F., deSouza, L., Cohen, J.D. and Holmes, P., A model of interval timing by neural integration, *Journal of neuroscience* 31(25): 9238-9253, 2011.
- 4) Luzardo, A., Alonso, E. and Mondragon, E., A ´ Rescorla-Wagner drift-diffusion model of conditioning and timing, *PLoS Comput Biol* 13(11): e1005796, 2017.