
GF(2^p) 다중 끌개를 갖는 셀룰라 오토마타의 합성 및 분석

최언숙* · 조성진**

Analysis and Synthesis of GF(2^p) Multiple Attractor Cellular Automata

Un-Sook Choi* · Sung-Jin Cho**

이 논문은 2006년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원
(KRF-2006-331-D00458)에 의해 수행하였음

요 약

셀룰라 오토마타는 오랫동안 모델링과 컴퓨팅 패러다임에 사용되어왔다. 그러한 시스템의 모델을 연구함에 있어서 물리계의 복잡성이 증가함에 따라 셀룰라 오토마타를 이용한 모델은 매우 복잡하고 분석적으로 추적하기가 어렵게 되었다. 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결의 대안으로 등장한 계층적 셀룰라 오토마타의 특별한 클래스인 GF(2^p) 다중 끌개를 갖는 셀룰라 오토마타의 특성을 분석하고 합성법을 제안한다.

ABSTRACT

Cellular Automata(CA) has been used as modeling and computing paradigm for a long time. While studying the models of systems, it is seen that as the complexity of the physical system increase, the CA based model becomes very complex and becomes to difficult to track analytically. Also such models fail to recognize the presence of inherent hierarchical nature of a physical system. In this paper we analyze the properties of GF(2^p) multiple attractor cellular automata (GF(2^p) MACA) \mathcal{C} and give a method of synthesis of \mathcal{C} which is a special class of hierarchical cellular automata proposed as an alternative to solve the problem.

키워드

계층적 셀룰라 오토마타, 전이규칙, CA의 합성, MACA, 특성다항식, 비그림 CA

* 동명대학교
** 부경대학교(교신저자)

I. 서 론

셀룰라 오토마타(이하, CA)는 셀이라 불리는 간단한 메모리의 배열로서 각 셀들의 상태가 국소적인 상호작용에 의해서 동시에 갱신되는 시스템이다. CA는 많은 물리계를 모델링하는데 사용되어왔다. 이는 CA가 그 구조가 간단하고, 규칙적이며 작은 단위로 확장연결이 가능하여 전용의 하드웨어를 사용하지 않고 실행 가능하도록 프로그래밍 될 수 있기 때문이다. 이런 특성을 가지고 있음에도 불구하고 시스템의 모델을 연구함에 있어서 물리계의 복잡성이 증가하여 CA를 이용한 모델이 매우 복잡하고 분석적으로 추적하기가 어렵게 되었다. 또한 그러한 모델들은 물리계의 내재적 계층적 성질의 나타남을 인식할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 계층적 셀룰라 오토마타(Hierarchical Cellular Automata, 이하 $GF(2^p)$ CA)가 그 대안으로 제안되었다 [1-3]. 그러나 $GF(2^p)$ CA의 분석이 어려워 $GF(2^p)$ CA의 특성들이 많이 연구되지 않았으며 또한 $GF(2^p)$ CA 생성방법은 아직까지 연구가 미흡하다. 1996년에 Cattell과 Muzio[4]는 최대길이를 갖는 90/150 CA 생성 알고리즘을 제시하였다. 그런데 이 알고리즘에 의하여 90/150 CA를 구현에 있어 요구되는 계산량은 $O(n^7)$ 이었다. 이후 2007년에 Cho[5] 등은 이 문제점을 보완하여 계산량이 $O(n^2)$ 인 90/150 그룹 CA를 생성하는 알고리즘을 제안하였고, 그 결과를 바탕으로 90/150 그룹 CA에 대응하는 $GF(2^p)$ 그룹 CA의 합성을 위하여 전이규칙과 특성다항식, 사이클 구조에 대하여 분석하였다[6]. $GF(2)$ 위에서의 90/150 비그룹 CA 중 해쉬함수와 이미지 압축에 응용되는 SACA(single attractor CA)와 반도체 설계 단계에서 회로의 결함을 찾기 위한 패턴 분류기로 이용되는 MACA(multiple attractor CA)의 합성법을 제안하였다[7]. 그러나 여전히 $GF(2^p)$ CA에 관한 합성법은 알려지지 않고있다. 본 논문에서는 $GF(2)$ 위에서의 90/150 MACA와 SACA에 대응하는 $GF(2^p)$ CA로 $GF(2^p)$ MACA와 $GF(2^p)$ SACA의 합성법을 제안한다. 제안하는 합성법은 $GF(2)$ 위에서의 90/150 TPSACA와 TPMACA의 합성법의 확장으로 계산량이 $O(\log_2 n)$ 이다.

II. $GF(2^p)$ MACA

$GF(2^p)$ CA는 기본 단위인 셀은 그림 1과 같이 p 개의 기억소자로 이루어지기 때문에 하나의 셀이 가질 수 있는 상태는 2^p 개로 $\{0, 1, 2, \dots, 2^p-1\}$ 의 원소이다.

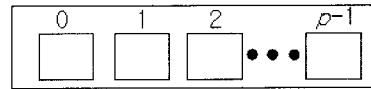


그림 1. $GF(2^p)$ CA의 셀 구조
Fig. 1. Structure of a $GF(2^p)$ CA cell

이러한 셀은 그림 2와 같이 국소적인 상호작용으로 다음 상태가 갱신된다. 주어진 i 번째 셀의 다음 상태는 자신과 이웃하는 두 개의 셀의 상태에 따라 결정되는데 $GF(2)$ CA와 달리 셀의 각 상태에 가중치를 곱한 후 XOR하여 다음 상태로 갱신된다. 이러한 CA를 선형 $GF(2^p)$ CA라 한다.

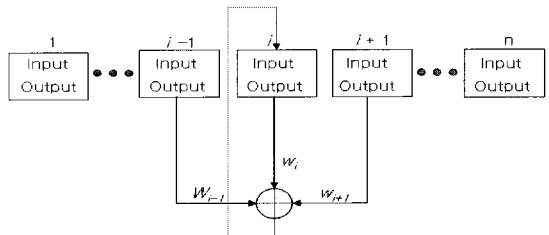


그림 2. $GF(2^p)$ CA의 구조
Fig. 2. Structure of a $GF(2^p)$ CA

선형 $GF(2^p)$ CA의 다음 상태를 전이시키는 상태전이함수를 정의하기 위해 먼저 한 개의 셀이 가지는 2^p 개의 상태를 생성해야 한다. 이를 위해 $GF(2)$ 의 확장체인 $GF(2^p)$ 를 생성하는 다항식을 생성다항식이라고 하고 이 생성다항식을 특성다항식으로 갖는 삼중 대각행렬을 생성행렬이라 한다. 본 논문에서 다루는 3-이웃 선형 $GF(2^p)$ CA의 상태전이함수는 다음과 같다.

$$q_i(t+1) = \phi(w_{i-1}q_{i-1}(t), w_i q_i(t), w_{i+1}q_{i+1}(t))$$

여기서 $q_i(t)$ 는 시간 t 에서 i 번째 셀의 상태를 나타내며 w_i 는 가중치로 $GF(2^p)$ 의 원소이다. 선형 $GF(2^p)$

CA의 상태전이행렬에서 오른쪽 이웃과 왼쪽 이웃에 대한 가중치를 동일하게 두는 것은 GF(2) 위에서 90/150 CA에 대한 자연스러운 확장이다. 따라서 가중치를 동일하게 두었을 때 상태전이행렬은 다음과 같다.

$$T = \begin{pmatrix} d_1 & \omega & 0 & \cdots & 0 \\ \omega & d_2 & \omega & \cdots & 0 \\ 0 & \omega & d_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & d_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 ω 는 가중치로 $\{0, 1, 2, \dots, 2^p - 1\}$ 의 원소이다. 주어진 T 를 간단히 $T = \langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle_\omega$ 로 나타내기 하고 이를 전이규칙이라 하자.

예를 들어 3셀 GF(2²) CA의 상태전이행렬이 다음과 같다고 하자.

$$T = \begin{pmatrix} 0 & \alpha^2 & 0 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha^2 \\ 0 & \alpha^2 & 0 \end{pmatrix} = \langle 0, 1, 0 \rangle_{\alpha^2} \quad (2)$$

여기서 α 는 GF(2²)를 생성하는 생성자이다. 따라서 GF(2²)의 원소는 0, 1, α , α^2 이다. α 는 생성다항식 $g(x) = x^2 + x + 1$ 의 해가 되고 생성행렬 M 은 다음과 같다.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

n 셀 GF(2ⁿ) CA의 현재 상태 x 에 대하여 다음 상태 y 는 $y = Tx$ 이다. GF(2ⁿ) CA의 상태 x 는 n 개의 GF(2ⁿ)의 원소인 α^i 로 이루어진 벡터로 표현된다. 유한체위에서 곱셈과 덧셈을 위해 α^i 와 M^i 의 마지막 열 벡터를 대응시킨다. 위의 예에서 생성행렬의 M^i 와 α^i 은 다음과 같다.

$$M^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, M^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\alpha = \langle 10 \rangle = 2, \alpha^2 = \langle 11 \rangle = 3, \alpha^3 = 1 = \langle 01 \rangle = 1, 0 = \langle 00 \rangle = 0$$

식(1)의 T 는 $T = \langle 0, 1, 0 \rangle_3$ 이다.

그리고 GF(2²)위에서 덧셈과 곱셈은 표 1과 같다.

표 1. GF(2²)위에서의 곱셈과 덧셈
Table 1. Addition and multiplication on GF(2²)

×	0	1	2	3	+	0	1	2	3
0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
1	0	1	2	3	1	1	0	3	2
2	0	2	3	1	2	2	3	0	1
3	0	3	1	2	3	3	2	1	0

GF(2ⁿ) CA의 상태전이행렬이 식 (1)과 같을 때, 특성다항식 $\Delta(x)$ 는 $\Delta(x) = |T + xI|$ 이다. 식 (2)의 T 의 $\Delta(x)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta(x) = |T + xI| = \begin{vmatrix} x & 3 & 0 \\ 3 & 1+x & 3 \\ 0 & 3 & x \end{vmatrix} = x^3 + x^2$$

CA는 상태전이그래프의 모양에 따라 그룹 CA와 비그룹 CA로 분류할 수 있다. 이는 T 의 행렬식으로 특성화 할 수 있다. T 의 행렬식이 0이면 비그룹 CA이고 T 의 행렬식이 0이 아니면 그룹 CA이다. 그룹 CA의 상태전이 그래프는 모든 상태들이 사이클에 놓이게 되는 반면 비그룹 CA는 도달 불가능한 상태들이 존재하며 상태전이그래프는 순환상태를 루트로 하는 트리모양을 이룬다. 비그룹 CA중 순환상태의 주기가 모두 1인 비그룹 CA를 MACA라 하며 특히 순환상태가 단 하나인 MACA를 SACA라 한다. 식(2)의 T 에 의한 상태전이는 표 2와 같다. 표 2에서 색칠한 부분의 상태들은 주기가 1인 순환 상태이고 이런 순환상태를 attractor라 한다. Attractor가 121인 트리는 상태 003, 102, 201, ..., 121로 이루어졌다. 주어진 3-셀 GF(2²) MACA의 상태전이그래프는 모두 깊이가 2인 4개의 독립된 트리로 구성되며 각 순환상태들은 모두 attractor이다. 상태 221은 시간의 변화에 따라 221→101→000으로 상태가 전이된다. 따라서 000-트리의 깊이는 3이다. 일반적으로 MACA의 최소다항식은 $x^d(x+1)$ 이며 여기서 d 는 MACA의 상태전이그래프에서 트리의 깊이가 된다[2]. 또한 n -셀 SACA의 최소다항식은 x^n 이며 이러한 SACA의 상태전이그래프는 깊이가 n 인 트리가 된다[3]. 가중치가 $\omega (\in GF(2^p))$ 인 GF(2ⁿ) CA는 90/150 CA의 확장으로 특성다항식과 최소다항식이 같다. 식(2)의 3-셀 GF(2²) MACA의 최소다항식은 $x^3 + x^2 = x^2(x+1)$ 이므로 상태전이그래프

의 트리의 깊이는 2이다.

표 2. $GF(2^2)$ MACA 상태전이
Table 2. State transition of the $GF(2^2)$ MACA

221	023	122	320	031	333	130	233	012	311	113	210
101				202				303			
000											
003	102	201	300	032	133	230	331	011	110	213	312
020				222				323			
121											
001	100	203	302	022	123	220	321	013	112	211	310
030				131				333			
232											
002	103	200	301	021	120	223	322	033	132	231	330
010				111				212			
313											

III. $GF(2^p)$ MACA 전이규칙

가중치가 ω 인 m -셀 $GF(2^p)$ CA의 전이규칙이 $T = \langle d_1, d_2, \dots, d_m \rangle_\omega$ ($\omega \in GF(2^p)$)일 때, 이 CA의 특성다항식을 Δ_m 이고, 주어진 CA의 i 번째 셀에서 j 번째 셀까지의 부분 CA의 특성다항식을 Δ_{ij} 라 하자. 그리고 $\Delta_{1,m-1}$ 은 간단히 Δ_{m-1} 라 하자. 그러면 특성다항식 Δ_m 에 대한 점화식은 다음과 같다[6].

$$\Delta_k = (x + d_k) \Delta_{k-1} + \omega^2 \Delta_{k-2}, \quad (k > 0)$$

$$\Delta_{-1} = 0, \Delta_0 = 1$$

주어진 CA의 전이규칙을 mirror image를 이용하여 합성한 $2m$ -셀 $GF(2^p)$ CA의 전이규칙을 다음과 같이 정의한다.

$$T = \langle d_1, d_2, \dots, d_m + \omega, d_m + \omega, \dots, d_2, d_1 \rangle_\omega$$

그리고 합성된 CA의 특성다항식을 Δ_{2m} 라 표현하도록 하자. 다음 정리는 mirror image를 이용하여 합성된 $GF(2^p)$ CA의 특성다항식 사이의 점화관계를 특성화한다.

[정리1] $2m$ -셀 $GF(2^p)$ CA의 전이규칙이 $T = \langle d_1, d_2, \dots, d_m, d_m, \dots, d_2, d_1 \rangle_\omega$ 라 할 때, 부분 행렬의 특성다항식은 다음과 같은 두 점화식을 만족한다.

$$(1) \quad \Delta_{i-1} \Delta_{2m-i-1} + \omega^2 \Delta_i \Delta_{2m-i-2}$$

$$= \Delta_{i+2} \Delta_{2m-i-1} + \omega^2 \Delta_{i+1} \Delta_{2m-i-3}$$

$$(2) \quad \Delta_{2m} = (\Delta_m + \omega \Delta_{m-1})^2$$

[증명] 주어진 전이 규칙 T 의 각 셀에 대한 규칙이 $d_{2m-i-1} = d_{i+2}$ 이므로 다음 식을 만족한다.

$$(1) \quad \Delta_{i+1} \Delta_{2m-i-1} + \omega^2 \Delta_i \Delta_{2m-i-2}$$

$$= \Delta_{i+1} ((x + d_{2m-i-1}) \Delta_{2m-i-2} + \omega^2 \Delta_{2m-i-3}) + \omega^2 \Delta_i \Delta_{2m-i-2}$$

$$= \Delta_{i+1} ((x + d_{i+2}) \Delta_{2m-i-2} + \omega^2 \Delta_{2m-i-3}) + \omega^2 \Delta_i \Delta_{2m-i-2}$$

$$= ((x + d_{i+2}) \Delta_{i+1} + \omega^2 \Delta_i) \Delta_{2m-i-2} + \omega^2 \Delta_{i+1} \Delta_{2m-i-3}$$

$$= \Delta_{i+2} \Delta_{2m-i-2} + \omega^2 \Delta_{i+1} \Delta_{2m-i-3}$$

(2)의 증명은 다음과 같다.

$$\Delta_{2m} = (x + d_{2m}) \Delta_{2m-1} + \omega^2 \Delta_{2m-2}$$

$$= (x + d_1) \Delta_{2m-1} + \omega^2 \Delta_0 \Delta_{2m-2}$$

$$= \Delta_1 \Delta_{2m-1} + \omega^2 \Delta_0 \Delta_{2m-2}$$

정리 1의 식(1)에 의해 위 식은 다음을 만족한다.

$$\Delta_{2m} = \Delta_{1+m-1} \Delta_{2m-1-m+1} + \omega^2 \Delta_{m-1} \Delta_{2m-2-m+1}$$

$$= \Delta_m \Delta_m + \omega^2 \Delta_{m-1} \Delta_{m-1}$$

$$= (\Delta_m + \omega \Delta_{m-1})^2 \quad \square$$

다음 정리들은 $GF(2^p)$ CA의 SACA와 MACA를 합성하는 근거가 되는 매우 중요한 정리이다.

[정리 2] 가중치가 ω 인 m -셀 $GF(2^p)$ CA의 전이규칙 $T_m = \langle d_1, d_2, \dots, d_m + \omega \rangle_\omega$ 의 특성다항식을 $f(x)$ 라 할 때, $2m$ -셀 $GF(2^p)$ CA 전이규칙 $T_{2m} = \langle d_1, d_2, \dots, d_m, d_m, \dots, d_2, d_1 \rangle_\omega$ 의 특성다항식은 $\Delta_{2m} = \{f(x)\}^2$ 이다.

[증명] 주어진 T_{2m} 의 특성다항식은 정리 1의 식(2)에 의해 $\Delta_{2m} = (\Delta_m + \omega \Delta_{m-1})^2$ 이다. 그리고

$$\Delta_m + \omega \Delta_{m-1} = (x + d_m) \Delta_{m-1} + \omega^2 \Delta_{m-2} + \omega \Delta_{m-1}$$

$$= (x + d_m + \omega) \Delta_{m-1} + \omega^2 \Delta_{m-2}$$

이다. 그런데 $(x + d_m + \omega) \Delta_{m-1} + \omega^2 \Delta_{m-2}$ 는 T_m 의 특성다항식 $f(x)$ 의 점화식이다. 그러므로 $\Delta_{2m} = \{f(x)\}^2$

이다. □

[정리 3] 가중치가 ω인 m-셀 GF(2^p) CA의 전이규칙 T_m = < d₁, d₂, ..., d_m >_ω의 특성다항식을 f(x)라 할 때, (2m+1)-셀 GF(2^p) CA 전이규칙 T_{2m+1} = < d₁, d₂, ..., d_m, 0, d_m, ..., d₂, d₁ >_ω의 특성다항식은 Δ_{2m} = x {f(x)}²이다.

[증명] 주어진 T_{2m+1}의 특성다항식은 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned} \Delta_{2m+1} &= (x + d_1)\Delta_{2m} + \omega^2\Delta_{2m-1} \\ &= \Delta_1\Delta_{2m} + \omega^2\Delta_0\Delta_{2m-1} \\ &= \Delta_2\Delta_{2m-1} + \omega^2\Delta_1\Delta_{2m-2} \\ &\quad \vdots \\ &= \Delta_{m+1}\Delta_m + \omega^2\Delta_{m-1}\Delta_m \\ &= \Delta_m(\Delta_{m+1} + \omega^2\Delta_{m-1}) \\ &= \Delta_m((x + d_{m+1})\Delta_m + \omega^2\Delta_{m-1} + \omega^2\Delta_{m-1}) \\ &= \Delta_m^2(x + d_{m+1}) \end{aligned}$$

그런데 d_{m+1} = 0이므로 Δ_{2m+1} = xΔ_m²이고 T_{2m+1}의 Δ_m은 T_m의 특성다항식 f(x)과 같다. 그러므로 Δ_{2m} = x {f(x)}²이다. □

T₁ = < 0 >_ω의 특성다항식은 c₁(x) = x로 1-셀 SACA이다. 따라서 정리 2에 의해 2-셀 SACA는 mirror image를 사용한 T₂ = < ω, ω >_ω로 합성되고 3-셀 SACA는 정리 3에 의해 T₃ = < ω, 0, ω >_ω로 합성된다. 같은 방법으로 합성하면 모든 크기의 셀에 대한 GF(2^p) SACA를 합성할 수 있다. 이제 가중치가 ω인 m-셀 GF(2^p) SACA가 주어졌을 때, 이로부터 유도되는 GF(2^p) MACA를 합성하는 방법을 제안한다.

[정리 4] 가중치가 ω인 m-셀 GF(2^p) SACA의 전이규칙 T_m = < d₁, d₂, ..., d_m >_ω이라 할 때, (2m+1)-셀 GF(2^p) CA의 전이규칙이 다음과 같은 CA는 MACA이다.

$$T_{2m+1} = \langle d_1, d_2, \dots, d_m, 1, d_m, \dots, d_2, d_1 \rangle_\omega$$

[증명] 증명은 정리 3의 증명과 매우 유사하다. 주어진 T_{2m+1}의 d_{m+1}의 값이 1이므로 특성다항식은 Δ_{2m+1} = Δ_m²(x + d_{m+1}) = Δ_m²(x + 1)이다. 부분특성다항식 Δ_m은 주어진 m-셀 SACA T_m의 특성다항식과 같으므로 Δ_{2m+1} = x^{2m}(x + 1)이다. □

표 3. 합성된 GF(2^p) SACA와 MACA
Table 3. Synthesized GF(2^p) SACA and MACA

n	SACA	MACA
1	< 0 > _ω	< 1 > _ω
2	< ω, ω > _ω	
3	< 0, 0, 0 > _ω	< 0, 1, 0 > _ω
4	< ω, 0, 0, ω > _ω	
5	< ω, ω, 0, ω, ω > _ω	< ω, ω, 1, ω, ω > _ω
6	< 0, 0, ω, ω, 0, 0 > _ω	
7	< 0, 0, 0, 0, 0, 0 > _ω	< 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0 > _ω
8	< ω, 0, 0, 0, 0, 0, ω > _ω	
9	< ω, 0, 0, ω, 0, ω, 0, ω > _ω	< ω, 0, 0, ω, 1, ω, 0, 0, ω > _ω
10	< ω, ω, 0, ω, 0, 0, ω, ω > _ω	
11	< ω, ω, 0, ω, ω, 0, ω, ω, 0, ω, ω > _ω	< ω, ω, 0, ω, ω, 1, ω, ω, 0, ω, ω > _ω
12	< 0, 0, ω, ω, 0, ω, 0, ω, ω, 0, 0 > _ω	
13	< 0, 0, ω, ω, 0, 0, 0, 0, ω, ω, 0, 0 > _ω	< 0, 0, ω, ω, 0, 0, 1, 0, 0, ω, ω, 0, 0 > _ω

표 3은 정리 2와 3에 의해 합성된 GF(2^p) SACA와 정리 4에 의해 합성된 GF(2^p) MACA의 전이규칙에 관한 표이다. 이렇게 합성된 (2m+1)-셀 GF(2^p) MACA 특성다항식이 x^{2m}(x+1)이므로 트리의 깊이가 2m이다. 따라서 하나의 트리를 이루고 있는 상태의 수는 (2^p)^{2m} = 2^{2mp}이다. 그리고 (2m+1)-셀 GF(2^p) CA의 총 상태의 수는 (2^p)^{2m+1} = 2^{2mp+p}이다. 따라서 attractor의 수는 2^{2mp+p}/2^{2mp} = 2^p이다. 표 3에 의하면 13-셀의 SACA를 합성하기 위해서 1셀 → 3셀 → 6셀 SACA를 합성하고 이를 이용하여 13셀 SACA를 합성하면 된다. 그러므로 n셀 SACA를 합성하는데 필요한 계산량은 O(log₂n)이다. MACA의 합성의 경우 13셀일 때, 13셀 MACA는 6셀 SACA로부터 유도되므로 6셀 SACA를 합성하는 과정은 13셀 SACA를 합성할 때와 같은 방법으로 합성한다. 따라서 n셀 MACA를 합성하는데 필요한 계산량 역시 O(log₂n)이다.

V. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 비트단위에서 처리하는 $GF(2)$ 위에서의 CA보다 복잡한 시스템을 모델링 하기에 적합한 $GF(2^p)$ CA 중 특별한 클래스인 MACA와 SACA의 특성 다항식의 점화관계를 분석하여 그 결과를 바탕으로 하여 모든 셀에서의 $GF(2^p)$ SACA를 합성하였다. 또한 얻어진 m -셀 $GF(2^p)$ SACA로부터 $(2m+1)$ -셀 $GF(2^p)$ MACA를 합성하였다. 이때 요구되는 계산량은 $O(\log_2 n)$ 이다. 이러한 CA는 $GF(2)$ 위에서 90/150 TPSACA와 TPMACA에 대한 자연스러운 확장으로 90/150 TPSACA와 90/150 TPMACA보다 2^p 배 이상 많은 $GF(2^p)$ SACA와 MACA가 존재함을 알 수 있다. 본 논문에서 얻어진 결과는 테스트 패턴을 분류하는 분류기에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] B. K. Sikdar, P. Majumder, M. Mukherjee, N. Ganguly, D.K. Das and P.P. Chaudhuri, "Hierarchical Cellular Automata As An On-Chip Test Pattern Generator", VLSI Design, Fourteenth International Conference on 2001, pp. 403-408, 2001.

[2] B. K. Sikdar, N. Ganguly, P. Majumder and P.P. Chaudhuri, "Design of Multiple Attractor GF(2p) Cellular Automata for Diagnosis of VLSI Circuits", VLSI Design, Fourteenth International Conference on 2001, pp. 454-459, 2001.

[3] S. J. Cho, U. S. Choi Y. H. Hwang, H. D. Kim and H. H. Choi, "Behaviors of Single Attractor Cellular Automata over Galois Field GF(2p)", LNCS 4173, pp. 232-237, 2006.

[4] K. Cattell and J. Muzio, "Synthesis of One-Dimensional Linear Hybrid Cellular Automata", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 15(3), pp. 325-335, 1996.

[5] S. J. Cho, U. S. Choi Y. H. Hwang, H. D. Kim, J. G. Kim and S. H. Heo, "New Synthesis of One-Dimensional 90/150 Linear Hybrid Group Cellular Automata", IEEE

Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 26(9), pp. 1720-1724, 2007.

[6] 최연숙, 조성진, 최향희, "계층적 셀룰라 오토마타의 특성에 관한 연구", 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 12(3), pp. 493-499, 2008.

[7] S. Chattopadhyay, S. Adhikari, S. Sengupta and M. Pal, "Highly Regular, Modular, and Cascadable Design of Cellular Automata-Based Pattern Classifier", IEEE Transactions on Very Large Scale Intergration (VLSI) Systems, Vol. 8(6), pp. 724-735, 2000.

저자소개

최 언 숙 (Un-Sook Choi)



1992년 성균관대학교 산업공학과 학사
2000년 부경대학교 응용수학과 석사

2004년 부경대학교 응용수학과 박사
2004년~2006년 영산대학교 자유전공학부 단임교수
2006년~현재 동명대학교 멀티미디어공학과 전임강사
※ 관심분야: 셀룰라 오토마타론, 정보보호, 부호이론

조 성 진 (Sung-Jin Cho)



1979년 강원대학교 수학교육과 학사
1981년 고려대학교 수학과 석사
1988년 고려대학교 수학과 박사

1988년~현재 부경대학교 수리과학부 정교수
※ 관심분야: 셀룰라 오토마타론, 정보보호, 부호이론, 컴퓨터 구조론