論文
9-1-4

셀룰라 오토마타의 원리 분석과 에지 추출 검증
EdgeDetection verification and principle analysis about Cellular Automata

남태희(Tae Hee Nam)[1]

요 약

본 논문은 Cellular Automata의 이론적 원리를 체계적으로 분석하였다. 특히 Cellular Automata는 transition rule를 이용하여 다양한 형태의 기능을 처리할 수 있다는 것을 암시하고 있다. Cellular Automata는 State, Neighborhood, Program Rules이라는 단순한 특징을 가지고 다양하고 복잡한 원리를 구현할 수 있다. 특히 영상 처리 분야에서 뛰어난 인식력을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 Cellular Automata를 이용하여 영상처리에서 중요한 Edge Detection을 시도하여 그 능력이 뛰어남을 규명하였다.

ABSTRACT

This treatise analyzed theoretical principle of Cellular Automata systematically. Specially, Cellular Automata is hinting that can handle function of various form using transition rule. Cellular Automata can embody various and complicated principle with simple identifying marks that is "State", "Neighborhood", "Program Rules". Specially, have eminent cognitive faculty in image processing field. Examined closely that the ability excels trying important Edge Detection in image processing using this Cellular Automata in treatise that see therefore.

논문 접수 : 2008. 2. 12.
심사 완료 : 2008. 2. 24.

1) 동주대학 의료기공학과 교수

1. 서 론

Cellular Automata(CA)는 1950년대 초 John von Neumann과 그의 동료 Stanislaw Ulam에 의해 발표된 이론으로 물리학, 화학, 컴퓨터 공학 등을 포함한 여러 공학 및 자연 과학 분야에서 다양한 동적 현상을 연구하는데 사용되어 왔다. Ulam은 맨허턴 계획에 사용되던 컴퓨터를 이용해서 기하학적 패턴을 재귀적 방식으로 재생산할 수 있는 프로그램을 만들었다. 재생산의 참된 특징은 물리적 로봇의 3차원 세계 보다 추상적인 기하학적 공간에서 더 쉽게 연구될 수 있다는 것을 시사한다. 이 시사가 von Neumann에게 중요한 개념적 돌파구를 열어주었는데, 바로 CA이다. CA를 규정하는 것은 크게 ,셀 당 상태의 수, 셀의 이웃, 규칙 3가지로 정의된다. 이후 Wolfram에 의해 스스로 조직화하고 재생산할 수 있는 여러 가지의 수학적 기초에 의해 다양한 모델이 소개되었다. 이러한 Cellular Automata의 원리 및 특성은 chaotic system과 artificial life을 연구하는데 주요한 수단으로 간주되고 있으며 동적이고 복잡한 자연현상을 시뮬레이션 하는데 유용한 도구로 사용되어 왔다. CA 모델은 네 가지의 기본 요소로 구성된다. 첫째는 셀룰라 공간으로 무한한 다차원의 공간을 동일한 크기의 셀로 분할한 공간을 의미하며, 여러 가지의 정규 다각형으로 분할이 가능하다. 셀룰라 오토마타는 자연의 현상(natural complex systems)을 계산의 형태로 나타내고자 하는 것으로 객체를 상호작용하는 오토마타인 셀들 즉 각 셀은 나름대로의 규칙을 갖는다는 것이고, 이들을 집단으로 보고 이 셀들 사이의 상호작용을 나타내는 것이다. 즉, 동일하게 프로그램된 오토마타, 또는 서로 상호작용하는 셀들의 배열이라고 할 수 있다. 이러한 배열들은 보통 1,2,3차원의 형태를 갖지만 대부분의 경우 셀들은 간단한 사각형의 행렬 형태로 정렬된다. 두 번째 구성요소는 지역 상태로, 이는 주어진 시간에서 각 셀의 상태, 즉 셀이 가지는 값을 의미한다. 세 번째는 이웃 셀(Neighborhood)과의 관계이다. 이웃 셀은 중심 셀 주위에 인접하고 있는 셀들의 집합을 의미하는데, 보통 거리, 방향 혹은 각도에 의해서 결정된다. CA의 주변 셀은 영상 처리나, 공간 필터의 마스크나 윈도우와 개념적으로 매우 유사하다. CA에서 주변 셀의 구성은 매우 자유롭기 때문에 다양한 형태나 크기의 구성이 가능하며, 다차원 혹은 매 시기별 다른 주변 셀을 구성할 수 있다. CA의 마지막 구성요소는 변화 규칙(transition rule)이다. transition rule은 각 셀이 매 시간별로 어떻게 변화할 지에 대해 rule을 정하는데, 여기에는 이웃 셀들의 구성과 위치가 정의되어 있다. transition rule은 모든 셀룰라 공간에서 동일하게 적용되는 공통 규칙(universal rule)으로 지역적인 특성을 지니고 있다. 이러한 CA는 원리상 이산적인 셀룰라 공간에 기반을 둔 시공간 동적 모델이라 할 수 있다. 따라서 CA는 discrete dynamical systems을 해석하는 한 방법으로 공간과 시간을 이산적으로 다루고, 이산적인 공간을 셀룰라 공간의 기본단위인 각 셀의 취할 수 있는 상태를 유한하게 처리하며, 각 셀들의 상태가 국소적인 상호작용에 의해서 동시에 갱신되는 시스템이다. 결론적으로 CA의 원리는 앞에서 언급된 몇 가지의 필수적인 특징을 갖는데 State, Neighborhood, Program Rules이 그것이다. 상태는 각각의 셀을 구분하는 변수로서 수 또는 성질을 말하며, 일정한 시간에 유한한 상태들 중에서 하나의 상태를 갖는다. 또한 Neighborhood은 상호작용을 일으키는 셀들의 집합을 의미하며 격자 모양 셀의 집합에서는 보통 가장 근접한 셀들이 그 집합에 속하게 된다. 마지막으로 Program Rules은 셀의 현재 상태와 그 셀의 이웃 상태에 따라 해당 셀의 다음 상태(next state)를 결정하는 규칙들의 집합이다. 본 논문에서는 이러한 CA에 대한 성질들을 소개하고, 영상처리 분야에서 적용될 rule을 제시하고자 한다.

2. CA 활용 범위

2.1 1 차원 CA

CA란 독립된 동적 시스템들이며, 시간과 공간을 이산적으로 다루는 시스템으로 셀룰라 공간의 기본단위는 하나의 셀로 구성되어 있다. 여기서 가장 간단한 방법의 구조로서 1차원 CA가 있다. 1차원 CA는 모든 셀들이 선형으로 배열되어 있다. 중요한 것은 국소적 상호작용이 세 개의 셀, 즉 자기 자신과 인접한 두 셀에 의해 이루어지는 3-이웃(3-Neighbourhood) CA이다. 1차원 CA는 다음과 같이 정의된다.

i : 일차원으로 배열되어 있는 각 셀들의 위치
t : 시간

$q_i(t)$: 시간 t에서 i 번째 셀의 상태
$q_i(t+1)$: 시간 $t+1$에서 i 번째 셀의 상태

·	·	·	$q_{i-1}(t)$	$q_i(t)$	$q_{i+1}(t)$	·	·	·

[그림 1] 중간 셀 q_i 상태와 시간 t에 대해 q_{i+1}과 q_{i-1}이 서로 인접된 상태
[Fig. 1] The cell states of the central cell q_i and its two nearest neighbors q_{i-1} and q_{i+1} at the time step t.

정의된 수식에 대해 1차원 CA의 rule 즉, 3-이웃 CA에 대한 상태 전이 함수(state-transition function)는 수학적 표기로서 다음과 같이 정리할 수 있다.

radius $r=1$ 일때,

$$q_i(t+1)=f[q_{i-1}(t),q_i(t),q_{i+1}(t)]$$

radius $r=0$ 일때,

$$q_i(t+1)=f[q_i(t)]$$

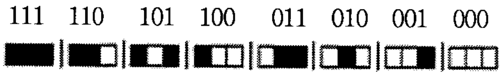
여기서 f는 결합 논리를 가지는 국소전이 함수이다. 3-Neighbourhood CA에는 서로 다른 2^3개 이웃의 배열상태가 있으며 그러한 CA에는 2^{2^3}개의 상태전이함수가 있게 되며, 이러한 원리를 CA의 rule이라고 한다. 3-Neighbourhood CA에서 셀들의 시간 t에서의 상태와 시간 $t+1$에서의 상태 배열의 예는 다음과 같다. 즉 1차원 배열에서 $k=2$ 이고, radius $r=1$일 경우 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서 k값은 각각 서로 다른 상태에서의 셀 값(range of cell state values)을 의미한다.

Neighbourhood state at t	111	110	101	100	011	010	001	000	Rule
Next state(t+1)	0	0	0	1	1	1	1	0	30
Next state(t+1)	0	0	1	1	1	1	0	1	60
Next state(t+1)	0	1	0	1	1	0	1	0	90
Next state(t+1)	0	1	1	0	0	1	1	0	102
Next state(t+1)	1	0	0	1	0	1	1	0	150
Next state(t+1)	1	0	1	0	1	0	1	0	170
Next state(t+1)	1	1	0	0	1	1	0	0	204
Next state(t+1)	1	1	1	1	0	0	0	0	240

<표 1>시간 t와 $t+1$에서의 상태 배열 예
<Table. 1> State arrangement example t and t+1 during time

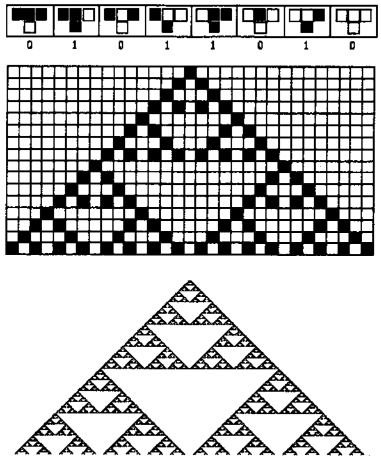
Table1 rule에 대한 논리는 다음 식으로 표현될 수 있고, 기호 ⊕는 XOR 연산자를 의미한다.

rule 30 :
$q_i(t+1)=$
$q_{i-1}(t) \oplus q_i(t) \oplus q_{i+1}(t) \oplus q_i(t)q_{i+1}(t)$
또는 $q_{i-1}(t) \oplus (q_i(t)+q_{i+1}(t))$
rule 60 : $q_i(t+1)=q_{i-1}(t) \oplus q_i(t)$
rule 90 : $q_i(t+1)=q_{i-1}(t) \oplus q_{i+1}(t)$
rule 102 : $q_i(t+1)=q_i(t) \oplus q_{i+1}(t)$
rule 150 :
$q_i(t+1)=q_{i-1}(t) \oplus q_i(t) \oplus q_{i+1}(t)$
rule 170 : $q_i(t+1)=q_{i+1}(t)$
rule 204 : $q_i(t+1)=q_i(t)$
rule 240 : $q_i(t+1)=q_{i-1}(t)$



[그림 2] 3-이웃된 1차원 배열
[Fig. 2] One-Dimensional arrangement of 3-Neighborhood

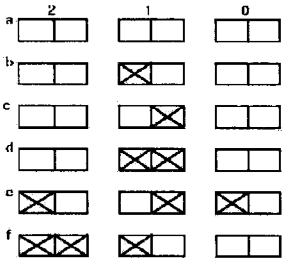
Fig2에서, rule은 on(1), off(0)의 두 상태를 갖는다. 살아있는 셀(Alive, on)은 기호 ■으로, 죽은 셀은(dead, off)은 기호 □으로 표시한다. 다음 규칙으로 "어떤 세대에서 중앙 셀이 on이고 이웃 셀 모두 on이 아닐 때만 그 셀은 다음 세대에서 on으로 남는다. 그 외 모두 off이다"를 □■□와 같이 표기한다. 즉 다음 세대는 초기배열에서 □■□의 형태가 있는가를 검토함으로 얻어진다. 이 배열이 있을 때는 중앙 셀은 on이 된다. 모든 셀이 off인 배열은 어디에도 □■□인 배열이 없기 때문에 off인 채로 머물게 된다. 예를 들어 rule 90을 적용하면,



[그림 3] 규칙 90에 대한 Diagram과 실행 결과
[Fig. 3] Diagram about rule 90 and practice result

2.2 CA 규칙 판

규칙판은 이웃 셀의 수가 3개 이상인 그림판 CA에서 표현하기 복잡한 경우 이용한다. 즉 복잡한 표현 방식을 데이비드 피크의 규칙판(rule table)을 이용하여 간단히 표현하면 다음과 같다. Fig4에서 a는 1차원 3개의 셀 규칙판으로 아직 빈칸으로 정의되어 있다. 박스위의 숫자는 중앙 셀 이웃의 on 셀의 수를 나타낸다. 두 칸으로 된 박스의 왼쪽은 중앙 셀이 on인지의 여부를, 오른쪽 박스는 중앙 셀이 off인지의 여부를 표시한다. 만일 왼쪽 박스에 ⊠이 표시되어 있다면 이것은 현재 중앙 셀이 on이라는 것을 의미하고, 오른쪽 박스에 ⊠이 표시되어 있다면 현재 중앙 셀이 off라는 것을 의미한다. 규칙판 b에서 ⊠이 표시된 경우를 보면, 두 번째 박스의 왼쪽 박스에 ⊠이 표시되어 있으므로 현재 중앙 셀이 on이라는 것을 의미한다.



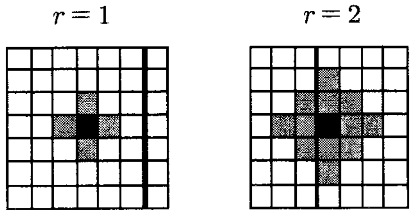
[그림 4] 규칙판

[Fig. 4] rule table

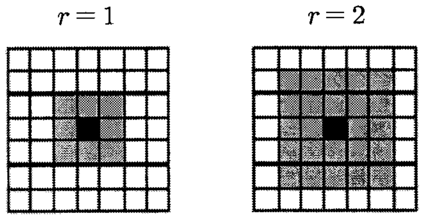
또한 박스 위에 '1'이 있으므로 이것은 이웃 on 셀이 하나라는 것을 의미한다. 결국 이것은 "현재 on인 중앙 셀이 이웃에 정확히 하나의 on 셀을 갖고 있다면 중앙 셀은 다음 세대에서 on이다" 라는 규칙으로 해독된다. 이것은 그림판 ■■□과 □■■의 총괄규칙이다. 규칙판c는 "현재 off인 중앙 셀이 이웃에 정확히 하나의 on세포를 갖고 있다면 중앙 셀은 다음 세대에서 on이 된다". 이것은 그림판 ■□□와 □□■의 총괄규칙이다. 규칙판d는 "중앙 셀이 하나의 on 이웃을 가지면 중앙 셀은 그것이 현재 on이나 off이냐에 관계없이 다음 세대에서 on이다"는 규칙이다.

2.3 2차원 CA

2차원 CA는 von Neumann과 Moore neighborhood의 원리에 따라 정의될 수 있다. 2차원 CA에 Neumann과 Moore 이웃은 Fig5와 같이 정의된다. Fig5의 구성은 2차원과 2개 state 구성으로 r 값에 대해 중앙 셀의 이웃을 정의한 것이다. 정의 반지름 $r=1$에서 von Neumann은 4개의 이웃 셀, Moore는 8개의 이웃 셀로 구성된다. 따라서 Moore 이웃은 대각선 원소를 담고 있는 von Neumann 이웃의 확대이다. 직사각형 배열에, Moore 이웃을 위해 유사하게 Fig6과 같이 von Neumann 이웃처럼 열거된다.



(a) von Neumann neighborhood

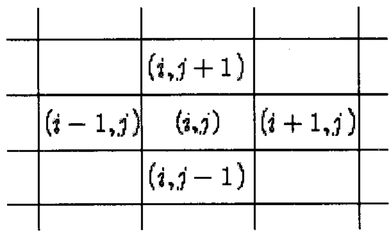


(b) Moore neighborhood

[그림 5] 반지름 r에 대해 폰 노이만과 무어 이웃

[Fig. 5] von Neumann and Moore neighborhoods with radius r

여기서 (i,j)번째 상태의 값은 $q_{i,j}$로 표시된다.



[그림 6] von Neumann 이웃 셀들의 계산 .

[Fig. 6] The enumeration of the cells of the von Neumann neighborhood

2차원 CA의 경우, Fig5와 같은 방식이 널리 연구되어 왔다. Fig5(a)는 어떤 셀의 동(E),서(W),남(S),북(N)의 4개 셀의 이웃이고, Fig5(b)는 북서(NW),북동(NE),남동(SE),남서(SW)의 4개의 셀을 부가한 8개 셀의 이웃으로 정의된다. 이것은 game of life을 시뮬레이트하기 위

한 각 2개의 상태 셀과 2차원 행렬이다. 라이프 게임은 2차원 CA를 표현하기 위한 가장 잘 알려져 있다. 이것은 영국의 수학자 J. Conway에 의해서 개발된 것으로 간단한 규칙을 적용해서 생명과 같은 복잡한 현상을 표현할 수 있다는 것을 보여준 최초의 시스템이다.

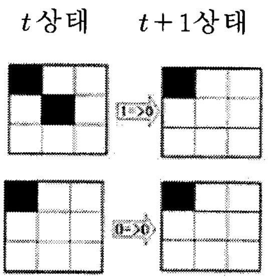
NW	N	NE
W	X	E
SW	S	SE

[그림 7] 폰노이만과 무어 이웃 관계
[Fig. 7] von Neumann and Moore neighborhoods relation

라이프 게임에서의 state, neighbourhood cell, rule은 다음과 같이 정의한다.

1) 상태 : 각 셀의 상태는 "0(dead)" 또는 "1(alive)"의 상태를 가진다. 단지 2 state는 셀의 조건을 표현하기에 충분하다.
2) 이웃 셀: 라이프 게임은 2차원 CA로 자신의 주변 8개의 셀을 이웃으로 하는 무어게임을 따른다.
3) 규칙

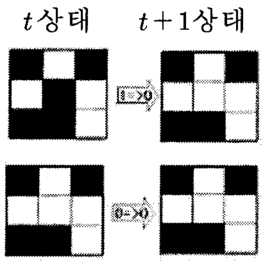
① 살아있는 이웃 셀이 1개 이하이면, 가운데 셀은 고립돼 죽는다.



[그림 8] 셀이 고립되어 죽는 경우
[Fig. 8] When cell are been isolated

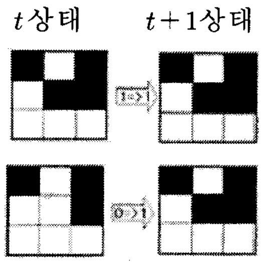
② 살아있는 이웃 셀이 4개 이상이면, 가운데 셀은 인구과잉으로 죽는다.

생존(alive) 이웃들의 수가 0, 1, 또는 4개 이상 8개 이하라면, 셀은 다음 세대에서 죽을 (dead) 것이다.



[그림 9] 셀이 과잉으로 죽는 경우
[Fig. 9] When cell run down by excess

③ 살아있는 이웃 셀이 3개이면, 가운데 셀은 새로 태어난다.



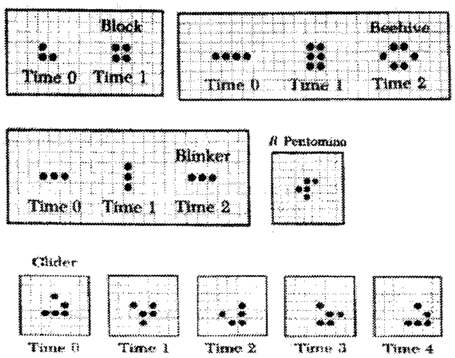
[그림 10] 셀이 새로 태어나는 경우
[Fig. 10] When cell are born newly

④ 나머지의 경우, 가운데 셀의 상태는 변하지 않는다.

2.3.1 Game of Life

사각형의 격자 속에 on 셀의 초기배열과 on 셀의 다음세대를 생산할 간단한 규칙을 규정해 준다. 라이프 패턴 중 간단한 것은 수작업으로도 검토할 수 있다. 예컨대 앞에서 언급된 것으로 고립된 셀은 다음 세대에서는 죽는

다. 붙어있는 두 on셀도 마찬가지이다. 고립된 4개의 on 셀은 그 상태로 얼어붙은 붙박이가 된다. 이것은 동력학의 고정점에 해당한다. 이것은 블록(Block)이라고 불리는데 이러한 붙박이로 벌집(Beehive)이라는 것도 있다. 이외 두 상태를 반복하는 깜박임(Blink)'라는 것도 있으며, 마치 걸어가는 듯이 보이는 글라이드(Glider)라 불리는 것도 있다.



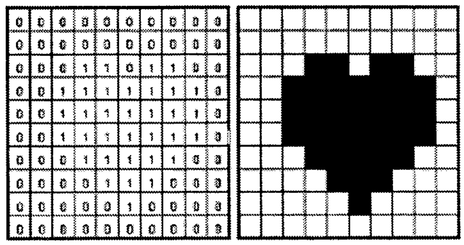
[그림 11] 라이프 패턴
[Fig. 11] Life pattern

3. CA 적용 범위

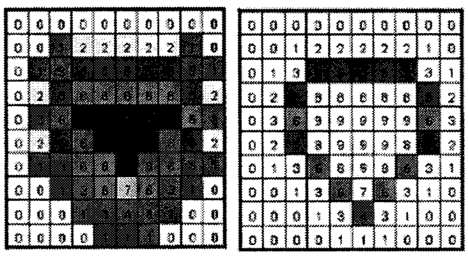
CA의 구조는 원시적인 동작만을 수행하는 cell들의 집합으로 구성되어 있다. 셀들 간 상호작용 패턴과 초기 값에 따라서 구조는 연속적인 state를 통해 진화한다. 앞에서 언급된 CA의 동질적 연구는 von Neumann이 자기 복제에 관한 연구에서 운동학적 모델과는 다른 자기 복제의 셀 모델을 구상하였다. 즉 5개의 이웃 셀들과 각각의 셀이 29개의 상태를 갖는 자기 재생(self-reproducing) 형태의 셀 공간을 고안하였다. 또한 Wolfram은 local 상호 연결을 가진 셀 구조의 단순화를 제안하였다. 이러한 단순하면서도 복잡한 원리는 주로 설계 분야 그리고 간단하면서도 규칙적이며, 모듈형이고, 연결이 가능한 local 상호 연결 구조에 매우 유용하다. 따라서 반도체 기술 즉 VLSI나 차세대 나도 테크놀로지에는 매우 뛰어난 강점을 가지고 있다. 결과적으로 CA의 이론과 응용은 패턴 인식(영상 처리), 언어 인식, 생물학 및 물리학의 모델링, 컴퓨터 구조, 암호해독, 프랙탈 및 카오스, 병렬처리 계산, 시뮬레이션 기계 등 다양한 분야에서 연구되고 있다.

4. 시뮬레이션

본 논문은 영상처리를 위해 2차원 Moore neighborhood를 적용하여 edge를 추출하고자 한다. 처리과정에서 시뮬레이션은 matlab을 이용하였으며, 데이터의 크기는 182X138이며, monochrome 이미지를 적용하였다. 2차원 영상 데이터는 M X N 규격화된 행렬에 의해서 표현된다. CA의 기본은 "0"과 "1"의 binary bit를 사용하여 영상 데이터 행렬을 형성시키며, 다음 단계의 매 셀의 이웃들의 수를 세는 것이다.



(a)binary data matrix (b)monochrome image



(c) number of neighbors matrix of color image
(d) dead cells loose their colors
[그림 12] 영상 처리 과정
[Fig. 12] Image processing process

간단한 이해를 위해, Fig12를 보자. Fig12(a)에 100 픽셀(10X10)의 영상 데이터를 binary 정보로 구성하였다. monochrome image는 Fig12(b)에 보여 진다. 여기서 CA의 다음 단계는 매 셀의 이웃들의 수를 세는 것이다. 본 논문에 Fig5 (b)에 제시된 Moore Neighborhood, $r=1$을 이용하여 이웃들의 수를 표현할 수 있다. 적용 셀은 최소 0과 최대 9개의 이웃을 이용하며, 매 수를 위해 10가지의 컬러를 사용한 이미지를 계획함으로써 Fig12(c)를 얻는다. edge 추출을 위해 본 논문에서 제시된 Game of Life을 이용하여 “alive”와 ”dead”를 규정한다. 제시된 규정에 따라 3개의 이웃 또는 그보다 적을 경우, 그리고 7개 이상의 이웃 셀은 과잉으로 “dead”가 된다. 따라서 5개 이웃과 셀은 ”alive”되며, 4내지 6개의 이웃은 이전 상태를 보존한다. 그러므로 결과 Fig12(d)를 구할 수 있다. 이제 정의된 규칙으로, 매 셀에 alive 이웃들의 수를 센 후, 만약 cell이 dead 또는 alive 되어야하면 정할 decision rule(DR)을 적용한다. 합 즉, number of decision rules(NDR)에 의해 표현된다. 참고로 상태 수는 2가지며, alive 1, 그리고 ” 0 ”은 dead이다. 그리고 이웃 수(Number of neighbors)는 10이다. alive 이웃들의 수는 0에서 9까지 있을 수 있다. 그러므로 NDR = 2^{10}(1024)가지의 패턴의 합이다. 앞에서 설명한 바와 같이 “3개의 이웃 또는 그 이하 그리고 7개 이상의 이웃 셀은 과잉으로 “dead”되므로 5개 이웃과 셀은 ”alive”되며, 4내지 6개의 이웃은 이전 상태를 보존한다.“는 규칙에 의해 다음과 같이 DR을 정의할 수 있다.

NAC ($\sum ij^{(t)}$)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DR	0	0	0	0	1	X	1	0	0	0
DR'	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

<표 2> NAC와 DR/DR'

<Table. 2> NAC and DR/DR'

여기서 테스트를 위해 ”X”에 “1”을 삽입하자. 그러면 Table2와 같이 DR'규칙은 56으로서 재정의 된다. 참고로 alive 이웃의 전체적인 수가 NAC(total number of alive neighbor, $\sum ij^{(t)}$)로서 표기할 수 있다. 실험에 적용된 모형은 Moore Neighborhood Mode로서 edge detection rule을 적용하였다. 그리고 alive state로 있을 셀의 선택을 적용하여 이미지를 검출하였다. 제시된 CA rule 56을 적용하여 edge detection method에 있어서 효율성을 검증해 보았다.

(a) Original image (b)Rule=56(0000111000)

[그림 13] 원 이미지와 에지 검출

[Fig. 13] Original image and Edge detection

5. 기대효과 및 결론

본 논문은 Cellular Automata에 1,2차원 이론적 원리를 분석하였다. 특히 CA는 transition rule를 이용하여 다양한 형태의 기능을 처리할 수 있다는 것을 암시하고 있다. 특히 영상 처리 분야에서 뛰어난 인식력을 가지고 있는 것으로 시뮬레이션에 의해 판명되었다. 앞에서 언급된 대로, CA는 State, Neighborhood, Program Rules이라는 단순한 성질을 가지고 다양하고 복잡한 원리를 구현할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 CA를 이용하여 영상처리에 중요한 edge 추출을 시도하였으며, CA가 영상처리에 뛰어난 능력을 가지고 있다는 것을 규명하였다. 따라서 과거 여러 이용된 추출 기법보다 한 단계 나은 검출 기법으로 사료된다. 따라서 향후 영상 암호화 및 저작권 등에 있어서도 강한 처리 능력

이 있음을 암시하고 있으므로 이에 대한 연구를 다음 논제로 제안하고자 한다.

참고문헌

[1] A. Popovici and D. Popovici, "Cellular automata in image processing", Proceedings of the 15th International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems, 2002.
[2] D. G. Green, "Cellular automata," http://life.csu.edu.au/complex/tutorials/tutorial1.html, 1993.
[3] Hilton Tamanaha Goi, An Original Method of Edge Detection Based on Cellular Automata, 2003.
[4] M. Cook, "Universality in elementary cellular automata", Complex Systems, vol. 15, pp. 1-40, 2004.
[5] http://alife.or.kr/ca.htm.

남 태 희

1993~현재: 동주대학 의료기공학과 부교수
1996~ 부경대학교 전자공학과 박사수료

관심분야 : Cellular Automata, 데이터베이스, 전자상거래, 패턴인식, MIS, GIS, ERP, 보건의료정보학