

## 50状態をもつ細胞オートマトン

八木 寛・松長 賢

This report proposes 50 states automata which extended 29 states ones thought out by von Neumann. This automata transfers out the information and receive in; it deals with information in three spaces. The qualities raised up more than 29 states automata.

## まえがき

近年、電子計算機をはじめ、各種自動操縦機械などに関する研究が急速な勢いで発展してきている。

しかしながら、現在の自動機械がはたして、自己と同一機械を生み出す自己増殖性という性質があるものであろうかと考えるとき、その解はもちろん、その見透しさえもついていないのが実情である。この課題を解きほぐす緒口としては、やはり自己増殖性とは何か。そして、その自己増殖性を機械にもたせるにはどうすれば良いのかということであろう。その可能性を調べるためになされた唯一の試みは、1966年に Von Neumann により発表された4方向性細胞オートマタである。彼の思想は生体細胞の増殖性を最も簡単な形で抽象化し、それにもとづく機械の増殖という、これまでにない飛躍的なオートマタを提唱した。

本研究は実際の生体細胞の情報伝達性に着目し、Neumann の細胞を二次元から三次元の世界へ拡張させた。その結果、生れた6方向性オートマトンがいかなる性質をもち、これまでのオートマトンのもつ特性がいかに拡大、変化するかを検討したものである。

その結果、4方向性の細胞は6方向性を持つことにより、状態数は29から50へと増大し、二次元の世界では考えられぬ、興味ある変化をとらえることができた。

## 細胞オートマタの状態遷移

Von Neumann は結晶の格子配列にヒントを得て、細胞オートマトンを提出した。彼のモデルは二次元を対象にしている。実際の生体細胞は三次元空間に

配列している。そこで筆者らは神経細胞をモデル化するために、三次元の空間に於ける細胞を立方体と仮定し、この細胞に図1のような6方向（各方向を

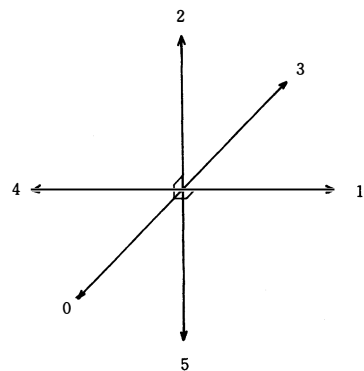


図-1 細胞の六方向の符号化

図1のような数字で記号化する)からの情報の移動性を仮定した。したがって、各細胞は、情報を伝達し合うことのできる6個の隣接した細胞を持つ。各細胞は任意の状態をとることができ、時間 $t+1$ の時の細胞の状態は、時間 $t$ の時のそれ自体の状態と、6個の隣接した細胞の状態によって決定される。各細胞のとりうる状態は次の6種類のいずれかである。

状態は大別して、一般情報伝達状態、特殊情報伝達状態、信号分岐状態、多数決状態、受感状態、破壊状態の6種類になる。

一般情報伝達状態 信号を伝達する状態として、一般情報伝達状態がある。考察下の細胞が情報伝達状態にあることは、その細胞が情報伝達が可能な状態にあるか、情報が現在きていない静止状態にあるかのいずれかである。それぞれの状態は6方向を持

50状態をもつ細胞オートマトン

ち、つぎのように記号であらわす。

$$R_{\alpha\epsilon} \quad (\alpha=0,1,2,3,4,5; \epsilon=0,1)$$

$\alpha$ ; 細胞の方向をあらわす添字

$\epsilon$ ; 細胞に情報が入っている状態(1)、入っていない状態(0)

たとえば、 $R_{00}$  (→にて図示)

$$R_{01} \quad (\dot{\rightarrow}\text{にて図示})$$

$$R_{00}, R_{10}, R_{20}, R_{30}, R_{40}, R_{50}$$

$$R_{01}, R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{51} \quad \text{合計10}$$

**特殊情報伝達状態** 特殊な情報を隣接する細胞に伝達可能にする状態で、対象にしている細胞が情報伝達状態にある場合か、情報伝達しうる状態にあるが、現在、情報はきていない状態かの両者がありうる。次の記号表現をする。

$$X_{\alpha\epsilon} \quad (\alpha=0,1,2,3,4,5; \epsilon=0,1)$$

$\alpha$ ; 細胞の方向をあらわす添字

$\epsilon$ ; 細胞に情報が入っている状態(1)、入っていない状態(0)

たとえば  $X_{00}$  (□にて図示)

$$X_{01} \quad (\dot{\square}\text{にて図示})$$

$$X_{00}, X_{10}, X_{20}, X_{30}, X_{40}, X_{50}$$

$$X_{01}, X_{11}, X_{21}, X_{31}, X_{41}, X_{51} \quad \text{合計10}$$

**情報分岐状態** 情報を分岐して伝達するための状態。単位時間遅延、ANDの機能を有する次の記号表現をとる。

$$C_{00}, C_{01}, C_{10}, C_{11} \quad \text{合計4}$$

**破壊状態** この状態は細胞が静止している状態である。この状態の細胞は情報を伝達しえない。細胞のモデルでは空白またはUであらわされる。したがって、細胞配列において、何の記号も記入されていない空白の部分は、全てUであらわされる状態の細胞が存在しているのと等価であるとみなすことができる。

**受感状態** 細胞が情報を受け入れ、特定な状態に成長しうる状態。次の記号表現をする。

$$S_{\theta}, S_0, S_1, S_{00}, S_{01}, S_{10}, S_{11}, S_{000}, S_{001}$$

$$S_{010}, S_{011}, S_{100}, S_{101}, S_{110}, S_{111} \quad \text{合計15}$$

この状態は任意のパルス列によりUより状態を変化してゆくものである。

**多数決状態** 細胞に入る情報が閾値を越すかいなかを判定するための状態。閾値により3種類、情報の入っている状態、入っていない状態の両者がある。

る。次の記号表現をする。

$$M_{20}, M_{30}, M_{40}, M_{21}, M_{31}, M_{41} \quad \text{合計6}$$

**状態遷移則** まず最初に、遷移則の基礎となる五つの規則についてのべる。

$$(D-1) \quad Q_1 \xrightarrow{1R} Q_2$$

時間tに於いて、 $Q_1$ なる状態の細胞Aは、時間tで興奮性一般情報伝達状態にある隣接細胞より情報を受けとり、時間t+1に於いて、 $Q_2$ なる状態に遷移する。

$$(D-2) \quad Q_1 \xrightarrow{1X} Q_2$$

時間tに於いて、 $Q_1$ なる細胞Aは、時間tで興奮性特殊情報伝達状態にある隣接細胞より、信号を受け取り、時間t+1に $Q_2$ なる状態に遷移する。

$$(D-3) \quad Q_1 \xrightarrow{cij} Q_2$$

時間tに於いて、 $Q_1$ なる細胞Aは、時間tで6個の隣接細胞の内の一つが  $C_{ij}$  なる状態にあるとき、時間t+1に $Q_2$ なる状態に遷移する。

$$(D-4) \quad C_{ij} \xrightarrow{P} C_{kh}$$

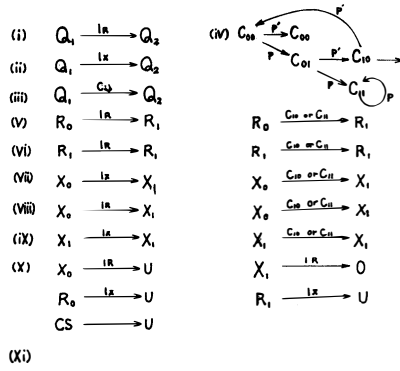
時間tに於いて、分岐状態  $C_{ij}$  なる細胞Aはつぎの二つの条件を同時に満足する場合においてのみ、時間t+1に於いて、状態  $C_{kh}$  に遷移する。

(1)細胞Aが時間tに於いて、興奮性一般情報伝達状態なる隣接細胞を持ち、それがAの方向に向いている。

(2)細胞Aに向い、かつ一般情報伝達状態にある隣接した全ての細胞が時間t+1に於いて、全て、興奮状態になる。

$$(D-5) \quad C_{ij} \xrightarrow{P'} C_{kh}$$

(D-4)の二つの条件のいずれかが満たされない時、時間tで分岐状態 $C_{ij}$ にある細胞Aは、時間t+1に於いて $C_{kh}$ と遷移する。これらの規則を記号表示すれば図2のようになる。



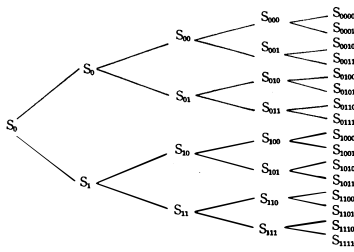


図-2 状態遷移則

細胞オートマタとその応用

前項に於いて定めた50状態の細胞を用い、その2、3の応用について考察する。

例1. パルサー 前項でのべた細胞から作られる集合体の例にはパルサーがある。その一つの単純なパルサーを考えてみる。そのパルサーは記号P(111)でしめす。これは、細胞の集合体として存在し、1でしめされる単位入力パルスが入ると、111のパルス列を出す特質を持つ。ここに、細胞に対する入力とはいくつかの隣接する細胞からその細胞が受けとる信号を意味する。同様に、細胞からの出力とはいくつかの隣接する細胞へ、その細胞から信号が発せられることを意味する。任意のパルス列を得るには、一般情報伝達状態なる細胞と分岐状態なる細胞を任意に組み合わせることによって得られる。組み合わせ方には種々あるが、ここではP(111)に関してこれらのうちの一つの方法をしめす。パルサーP(111)につき、その時間経過における細胞の状態変化と出力状況を図3にしめす。このパルサーP(111)をモデル化するにあたって、モデル図がわかりやすいように各段を分解して、平面的に図を描いてある。パルサーP(111)には12個の細胞が存在し、その内2個はUなる状態である。t=0でn+1層の分岐状態の細胞に入力パルスが入るとする。規則(R5)を適用すると時間t=1、2、3に於いて、分岐状態にある細胞の状態が変化し、時間t=3に於いて、入力信号は分岐状態の細胞を通りぬけ、三方向へと分岐して伝達される。このようにして、信号が次々と細胞を伝わり、時間t=7、8、9と連続に出力を出す。成長、演算、記憶等においては、それぞれの作業を成就するのに特定のパルスを必要とする。パルサーはこのパルス列を供給するも

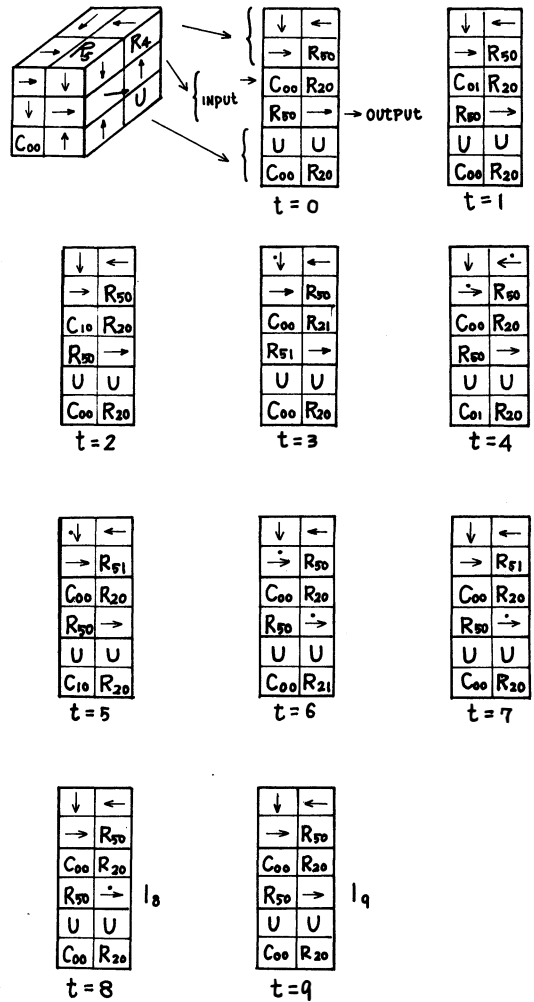


図-3

のである。またパルサーには一回だけパルス列を出すものと、停止信号が入らない場合、無限に、パルス列をくり返し出すものがある。パルサーでは入力信号がパルス列の長さより短い時間に続いて入らないように注意がいる。

例2. 演算器 細胞の組み合わせによって色々な演算器が構成される。これらはすべて2進法による演算器である。2進法における記号1は、ここでは入力信号があることを意味し、記号0は入力信号がないことを意味する。

<加算器について> 演算器の単純な構成として加算器がある。加算器の細胞回路図を図4にしめす。例題をかゝげて、実際の情報処理過程の説明をしよ

う。

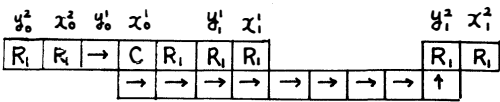
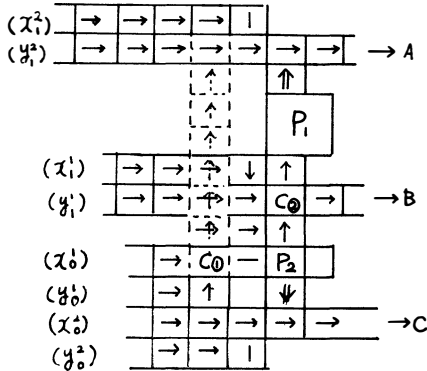


図-4 加算器の細胞回路図

$x_n^a, y_n^a$   $n = 0, 1, \dots, n$  2進法の各桁  
 $a = 1, \dots$  くり上り用細胞路  
 $2, \dots$  加算用細胞路

図中、点線でかこんだ部分は分岐細胞 $C_1$ の $R_0$ 方向より出る細胞路で、 $2^0$ 桁からのくり上げパルスを送達する。この細胞路は $x_0, x_1, y_1$ の細胞路の下をくぐってのびている。横からの断面図は図4-2のとおりである。

- ①  $x_0^a = 0, y_0^a = 0$
  - ②  $x_0^a = 1, 0, y_0^a = 0, 1$
  - ③  $x_0^a = 1, y_0^a = 1$
- ①の場合には、 $2^0$ 桁の細胞路には、信号が流れないので、 $2^0$ 桁の解は0となる。
- ②の場合には、 $(x_0^a, y_0^a)$ 細胞路は和回路となっているので解は1となる。この時、 $(x_0^a, y_0^a)$ 細胞路のいずれか一方の細胞路には信号が流れるが、分岐状態 $C_1$ のAND作用によって、くり上げ用細胞路には信号は流れない。
- ③の場合には、 $(x_0^a, y_0^a)$ 細胞に同時に信号が流れ、分岐状態 $C_1$ により出力がでて、パルサー $P_2$ が活動状態になり、そのパルサーからの出力が、特殊情報伝達状態に信号を伝える。この特殊情報伝達状態からの信号によって、 $2^0$ 桁細胞路の一般情報伝達状態の細胞を殺す。この時  $(x_0^a, y_0^a)$ からの和信号がその一般情報伝達状態の細胞に同時に入るが、破壊則により、信号は次の細胞には伝達しな

いので $2^0$ 桁細胞路は0となる。また $C_1$ からの信号は $C_2$ と $(y_1^a)$ 細胞路へと流れる。 $2^1$ 桁の  $(x_1, y_1)$ の細胞路の内いずれか1つが1の場合、 $C_2$ によって、 $2^0$ 桁からのくり上り用パルスとが論理積によって、 $2^0$ 桁くり上げ用細胞路と、パルサー $P_1$ へ流れる。パルサー $P_1$ は信号を出して、 $2^1$ 桁路の細胞を殺し、そのパルサー列によって、またもとの状態にもどす。 $(x_1, y_1)$ 細胞路がともに0の場合くり上げ用細胞路からのパルスが $(y_1^a)$ 細胞路にとどき、 $2^1$ 桁路を流れて、 $2^1$ 桁の解は1となる。このようにして加算がおこなわれる。この回路機構を増やせば $m$ 桁の計算が行なえる。

例3 増殖作用と成長 生物体の成長は細胞が次々と分裂することによって行なわれる。細胞オートマトンに於いては、空間が静止状態Uの細胞によって満たされていると考える。この空間に於いて、特殊情報伝達状態と一般情報伝達状態の組合せの集合体、以下腕とよぶ、が存在する。その腕から静止状態の細胞に特定のパルス列が入り、Uの状態を逐次遷移させることによって細胞の腕をのばすことができる。まず初めに、成長の基本モデルにつき述べ、それを応用して、あらゆる方向に腕を成長させることをのべる。成長のモデルを図5に図示する。 $I_1, I_2$ を入力とし、それぞれの入力にパルス列を入れる。

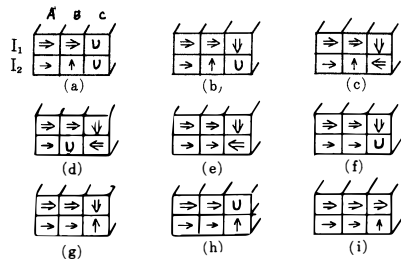


図-5 成長のモデル

図4は細胞の変化にのみ着目している。

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I_1$	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
$I_2$	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0

図4の(a)~(i)は細胞が状態を変化させて、1個だけ(1)方向へ成長してゆく過程である。腕の構造は(a)図のようになっていて、左端 $I_1$ より、上記のパルス列が入力される。パルスには1から16までの番号

がつけられている。まず1番の1が(B, I<sub>1</sub>)のX<sub>10</sub>の細胞より隣接するUの細胞に到達すると、UはS<sub>θ</sub>になる。つぎに順次2番から5番の0 1 1 0がくると、S<sub>θ</sub> → S<sub>0</sub> → S<sub>01</sub> → S<sub>011</sub> → S<sub>0110</sub>と変化する。ここでS<sub>0110</sub>はX<sub>00</sub>である、(図5,b)。つぎに6番から10番までのパルス列が(C, I<sub>1</sub>)を通過して、(C, I<sub>2</sub>)のUなる細胞に到達する。ここで、Uは状態を変化させる。このパルス列(1 1 0 1 0)によって、(C, I<sub>2</sub>)の細胞はX<sub>40</sub>になる、(図5,c)。11番のパルス1は(A, I<sub>1</sub>)(B, I<sub>1</sub>),(C, I<sub>2</sub>)と伝達されて、(B, I<sub>2</sub>)を刺激する。(C, I<sub>2</sub>)の細胞は特殊情報伝達状態X<sub>40</sub>であるから、破壊則によって、(B, I<sub>2</sub>)の一般情報伝達状態R<sub>00</sub>は破壊されて、破壊状態Uとなる、(図5,d)。さらに入力I<sub>1</sub>より12番から16番の情報が伝達される。この(1 0 0 0 1)のパルス列によって(B, I<sub>2</sub>)の破壊状態Uは一般情報伝達状態R<sub>00</sub>となる、(図5,e)。入力I<sub>2</sub>より、1番のパルス1が入ることによって、(C, I<sub>2</sub>)の特殊情報伝達状態X<sub>40</sub>はUになる。2番から6番までのパルス列(1 0 0 1 1)によって、静止状態Uの細胞(C, I<sub>2</sub>)は一般情報伝達状態R<sub>00</sub>となる、(図5,g)。7番のパルス1によって、(C, I<sub>1</sub>)の特別情報伝達状態X<sub>00</sub>は破壊状態Uとなる、(図5,h)。入力I<sub>2</sub>

から8番~12番のパルス列が伝達されて、(C, I<sub>1</sub>)の静止状態UをX<sub>00</sub>に変化させる。(図5,a)から(図5,h)の作用により、細胞の腕は1細胞だけ成長したことになる。前記のパルス列をくり返すことにより、腕をどんどん成長させることができる。

〈分岐成長について〉 いままでは成長の方向を一方ずつ変えていたが、成長点において、同時に任意の方向に成長させうるのが分岐成長である。分岐成長の過程を図6にしめす。成長する腕は図6の構造をもつものとする。成長の本体はZ<sub>1</sub>段であり、Z<sub>2</sub>段は補助的な役割を果す。①図から⑨図迄はZ<sub>1</sub>段についての成長過程であり、⑩図はZ<sub>2</sub>段における補助成長の略図である。⑪図は成長点における分岐の最終図である。Z<sub>1</sub>段の最初の成長点の構造は①図の通りである。入力Bからのパルス列によって、②図のようになる。つぎにAからのパルス列によって③図のようになり、Aからのパルスで一般情報伝達状態が破壊され、Uなる状態になったとき、Bからのパルスで④図のようになる。そしてAからのパルス列によって⑤図のようになり、BからのパルスでX<sub>00</sub>がUに変わり、UがBのパルスによってR<sub>00</sub>となるので、⑥図のようになる。⑥図において、BからのパルスでR<sub>00</sub>の腕ができ⑦図となる。⑧図ではAからパルスがきて、R<sub>00</sub>がUとなり、UがX<sub>00</sub>となっている。①図から⑧図において、それぞれの方向へ、任意個ずつ細胞の腕を成長させてゆくものとする。⑨図において、分岐状態の細胞を作るのは、成長し終った時点において、信号を分流させるためのものである。⑨図の分岐状態の細胞に隣接する特殊情報伝達状態をR<sub>00</sub>に変化させるため、Z<sub>2</sub>段を⑩、⑪図のように成長させる。成長した一般情報伝達状態の細胞から信号を伝達して、特殊情報伝達状態X<sub>00</sub>をR<sub>00</sub>に変化させる。⑫図がこの様子をしめす。

結 び

Von Neumannの4方向性細胞オートマタを6方向性細胞オートマタに拡張することにより、状態数は50個に増した。このことはとりもなおさず二次元の世界から三次元の世界へ情報処理過程を移したことにあたるわけであるが、このことにより、かなり自由度のある情報処理機能が遂行できるようになった。将来は神経細胞の如く、状態数をさらに増加さ

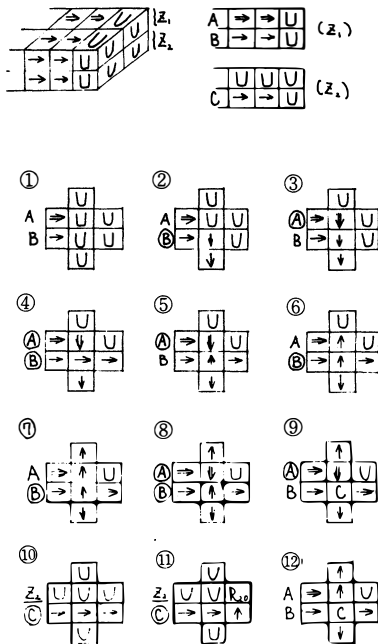


図-6

せることにより、より複雑な行動をもしめすようなオートマタができるであろう。これらの機能をそなえたオートマタにより、並列情報処理、パターン認識、学習などのような人間の頭脳に近い情報処理をおこなうことができるようになるであろう。

最後に、本研究をすゝめるにあたり、終始暖かいはげましと熱心な御討論をして下さいました四谷平治教授ならびに制御工学講座の研究室の皆様、心から謝意を表します。

参 照 文 献

1. von Neumann, J.; Computer and the brain. Yale Univ. Press. (1960)
2. von Neumann, J.; in "Theory of self-reproducing Automata, Burk ed. Umi. of Iuinois. Press. (1966)
3. Chester Lee ; in "Applied automata theory „ Ton ed. Academic Press (1968)
4. 和田英一；フォン・ノイマンの自己増殖機械  
I、II ； 科学
5. 中野 馨；ロボットの自己増殖  
バイオテク Vol 1. No.3
6. M. Minsky ; 計算機の数学的理論  
近代科学社 (1967)
7. 南雲仁一；バイオニクス 共立出版 (1968)
8. R.K.Richards ; デジタル計算機の演算方式  
光琳書院 (1960)
9. J.Z. ヤング； 人間はどこまで機械か  
白楊社 (1956)
10. 勝木保次編；中枢神経制御 I、II 共立出版 (1968)

受付 昭和48年11月17日