

解 説

7. 自己増殖機械



7.1 フォン・ノイマンタイプの自己増殖機械†

芹 沢 照 生††

1. はじめに

生物のように自分の子供を作る能力を持つ機械を設計するにはどうしたらよいのか、そのような自己増殖する機械のモデルを最初に考えたのは von Neumann であった¹⁾。彼の自己増殖機械は二次元のセルオートマトン（同一の有限オートマトンが格子状に無限にならんだもの）の世界に住んでいて、自分の持っている子供の機械の設計図（遺伝情報）に従って工作用の腕をのばして子供の機械を作るといったものであった。

セルオートマトンの世界では、個々のセルはその近くのセル（近傍）とつながっていて、あるセルが時刻 $t+1$ にとる状態は近傍のセルの時刻 t の状態によって決まる。von Neumann のセルオートマトンは 29 状態ノイマン近傍（自分自身と四隣からなる近傍）のものであったが、その後、同じ近傍で状態数の少ないセルオートマトンであっても自己増殖機械が作れるこ

とが示された。Codd の 8 状態²⁾、Banks の 4 状態³⁾、芹沢の 3 状態⁴⁾ のモデルがそれである。ここでは 29 状態と 3 状態のセルオートマトン上の自己増殖機械を紹介する。

2. von Neumann の自己増殖機械

2.1 29 状態のセルオートマトン

von Neumann は自己増殖機械のモデルとして、運動学的モデル、神経回路モデル、非線型微分方程式モデルなどいくつかのものを考えていた。それらのモデルの中で実際に自己増殖機械を構成できたのがこれから述べるセルオートマトンを用いたモデルである。

セルオートマトンはセルの状態と状態遷移規則とによって決定される。von Neumann の 29 状態セルオートマトンの遷移規則を簡単に説明する（図-1 を参照）。

普通伝達状態（図では \Rightarrow であらわす）は 3 入力 1 出

	静 穏	興 奮	個 数	主 な 用 途
普通伝達状態	\Rightarrow \uparrow \Leftarrow \downarrow	\Rightarrow \uparrow \Leftarrow \downarrow	8	OR回路, \Rightarrow の消去
特別伝達状態	\Rightarrow \uparrow \Leftarrow \downarrow	\Rightarrow \uparrow \Leftarrow \downarrow	8	OR回路, \Rightarrow C の消去
合 流 状 態	C_{00}	C_{01} C_{10} C_{11}	4	AND回路, 分岐, \Rightarrow に信号を伝える, 時間遅れ
休 止 状 態	\square		1	
潜 像 状 態	S_0 S_1 S_{255}		8	静穏状態へと遷移する

図-1 29 状態セルオートマトン

† Self-Reproducing Automata of von Neumann Type by Teruo SERIZAWA (Department of Electronic Engineering, Kogakuin University).

†† 工学院大学電子工学科

力の OR 回路として働く状態である。伝達状態には静穏と興奮と 2 つの状態がある。興奮している状態はパルス（信号 1）を持っている状態である。このパルスは次の時刻にその出力方向にあるセルに伝えられ、そのセルを興奮させる。このようにしてパルスは伝達状態でできている信号線の上を次々と伝えられていく（図-2）。

合流状態 C は方向を持たない状態である。C を出力方向に持つすべての普通伝達状態が興奮した時にはじめて C は興奮する。このように C には AND 回路としての働きがある。C の出力は C を入力方向としている \rightarrow や \Rightarrow に伝えられる。また、C は 1 クロックの遅れを内蔵している。C に入力したパルスは 1 クロック遅れて C を興奮させその次のクロックで出力される。そのために C の内部状態の数は 4 となっている。C のこの遅れ動作のおかげで任意時間の遅れ回路をつくるのが可能となっている。

特別伝達状態 \Rightarrow は普通伝達状態 \rightarrow と同じような信号線を構成する。しかし、興奮した \Rightarrow の出力方向にもし

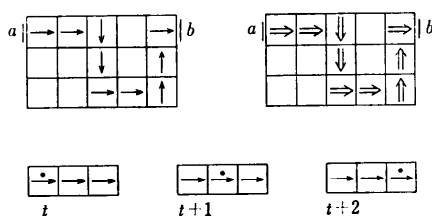


図-2 信号線とパルスの伝播

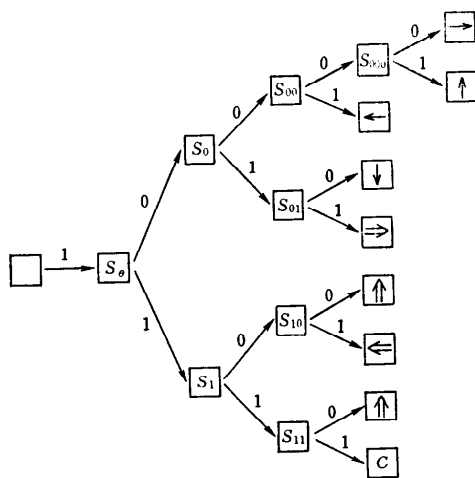


図-3 潜像状態の遷移

も \rightarrow や C があるとそれらのセルを破壊して休止状態にする働きがある。同じように興奮した \rightarrow には \Rightarrow を破壊する働きがある。このようにして任意の状態を休止状態に変えることができる。

休止状態のセルはそのセルを出力方向としている興奮した \rightarrow や \Rightarrow からのパルスによって潜像状態 S_0 に変化する。 S_0 は不安定な状態であり、次のクロックでパルスがくるかこないかによって S_1 あるいは S_0 に遷移する。このように S_0 はその後のパルス系列によって 9 種類の静穏状態のどれか 1 つへと変化をとげ、その後は安定となる（図-3）。

2.2 基本回路

次に、この 29 状態セルオートマトン上にいくつかの基本回路を設計する方法を述べる。AND 回路、OR 回路、分岐回路（図-4）などはセルの状態遷移規則をそのまま利用して作ればよい。

パルサ（図-5）は任意のパルス系列を発生する回路である。パルス列内の 1 の数だけパルスを複製し、遅れ回路をとし、それらを合成して出力する。

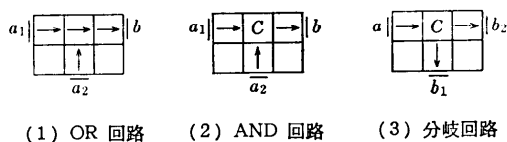


図-4 最も基本的な回路

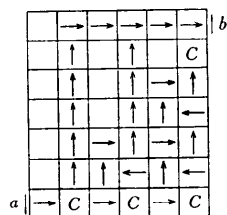


図-5 パルサ P(10010001)

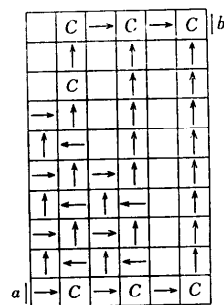


図-6 デコーダ D(10010001)

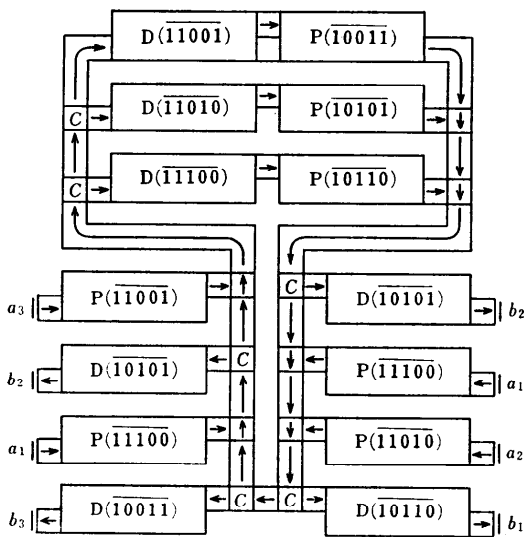


図-7 コーデッドチャネル

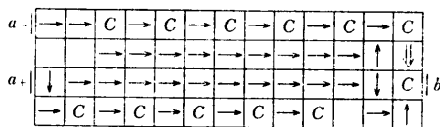


図-8 フリップフロップ

デコーダ (図-6) は特定のパルス列を認識して出力を出す回路である。そのしくみはパルスの逆で、AND回路を使ってパルス系列内部の特定の位置に1があることを調べている。

パルサとデコーダを組み合わせると、コーデッドチャネル (図-7) を構成することができる。このチャネルによって特定の場所から特定の場所へと共通の信号線を使って信号を送ることが可能となる。また、このコーデッドチャネルは信号の交差の問題をも解決している。

図-8の回路はフリップフロップである。 a_+ にはいった信号は $\overline{11111}$ というパルス系列を発生し、図の右下にある4つのセルからなるループを興奮させる。5つのパルスはループ内を無限に回転しながら、 b に出力を出し続ける。 a_- の信号もパルス $\overline{11111}$ を発生する。このパルス列の最初の1はCを介して↓に伝えられその下にあるCを破壊する。次の1は休止状態を S_0 に変化させ、のこりの $\overline{111}$ のパルスによって結局Cを再生する (図-3 参照)。このときループ内にパルスがあったとしても、Cを再生する過程で消費されてしまい、ループ内のパルスはなくなってしまふ。

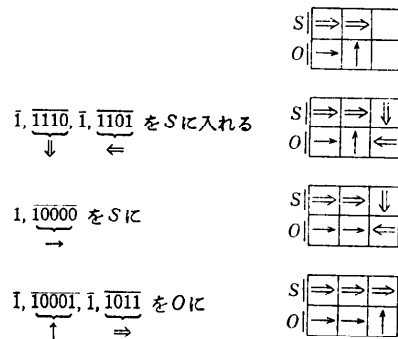


図-9 腕の前進

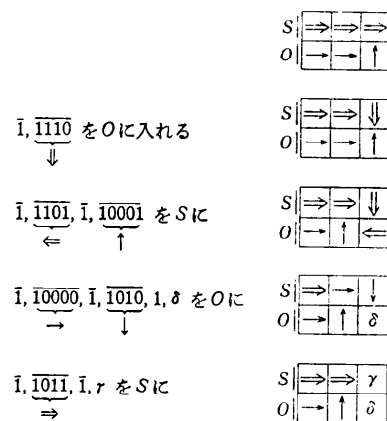
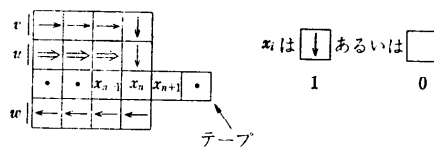
図-10 腕を後退させて r と δ を作る

図-11 テープの読み書き

このように、この回路はセット入力 a_+ 、リセット入力 a_- を持つ RS フリップフロップとしての動作をおこなうことができる。

2.3 腕とテープ

自己増殖機械は工作用の腕をのばして子供の機械を作る。この腕は \Rightarrow と \rightarrow の2つの信号線からできており、先端部分は図-9、図-10のようになっている。この腕はS、Oに信号を加えることによって上下左右に移動させることが可能である。図では左右の移動の場合のみを示した。腕を左に縮める場合には、縮めてできた空きセルに任意の静穏状態をおくことができる (図-10)。このようにして静穏状態だけからなる子供

の機械を作ることができる。

子供の機械の情報は、記号数2のチューリングテープ(片側無限長)に記憶されている。休止状態が0をあらわし、↓が1をあらわすように決めてあるので、無限長のテープであってもその有限部分のみを考えればすむようになっている(テープも含めた自己増殖機械の大きさを有限にすることができる)。

テープの読み書きには3本の信号線からなる回路を使う(図-11)。テープを読むには図の v に10101というパルスを送る。 w にもどってきたパルスが同じものであればテープには1が書いてあったことになり、 $\bar{1}$ のみならばテープには0が書いてあったことになる。どちらにしてもテープを読むとテープ上の記号は常に1に変化する。テープに記号を書き込んだり、テープの位置を左右に動かしたりする動作は、 v, u に特定のパルス系列を送出することにより実行可能である。

2.4 自己増殖機械

今まで述べてきた素子(回路)を組み合わせると自己増殖機械を作ることができる(図-12)。この自己増殖機械は組み立てユニット(CU)とメモリ制御(MC)との2つの部分から成る。CUとMCとは次の8つの信号によって交信している。

- | | | |
|--------------|-------------|--------------------------|
| O_1 テープを読み | i_1 0を読んだ | i_3 作業終了
i_5 ちぢめる |
| O_2 0を書け | i_2 1を読んだ | |
| O_3 1を書け | | |
| O_4 のばせ | | |
| O_5 ちぢめる | | |

MCはこれら5つの命令 O_i に応じたパルス列を発生し、それによってテープを制御する。作業が終る

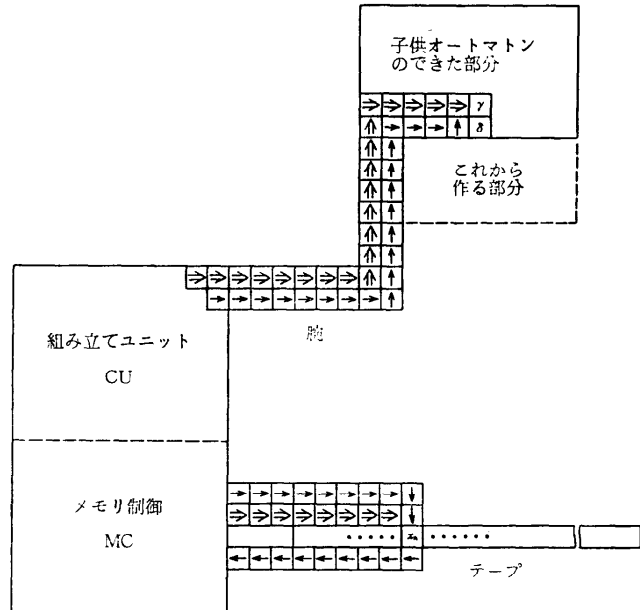


図-12 von Neumann の自己増殖機械

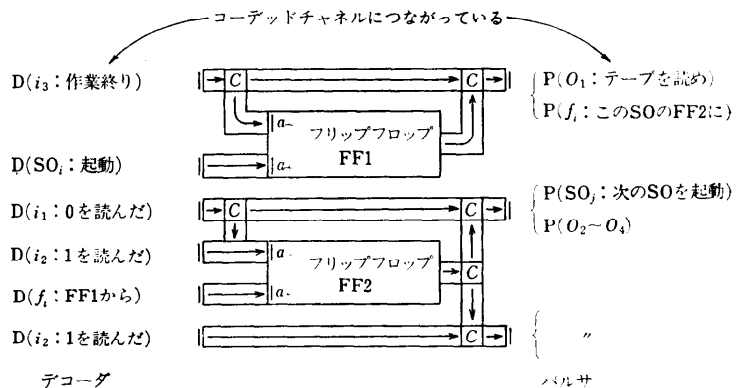


図-13 状態器官 (SO)

と MC は CU に i_j を返してそれを知らせる。

テープの情報を利用して子供の機械を作る CU は、それ自体が1つの有限オートマトンとなっている。このオートマトンの1つの内部状態に対応しているのが図-13に示す状態器官(SO)である。

1つのSOはFF1へのセット入力 a_+ によって動き始める。1つ前のSOによるMCの作業が終るとSOはテープを読む命令 O_1 を発行し、FF1をリセットし、FF2をセットする。テープ上の記号が読まれるとその記号(1か0)に応じて、次に実行すべきSOと、テープに関する命令とが選択されるよう

になっている。このように多数の SO と MC との組み合わせはチューリング機械そのものを構成している。さらに SO の出力に腕を制御する命令を組み合わせれば、万能工作機械ができあがることになる。

万能工作機械を自己増殖機械に変えるのはむずかしい。自己増殖は次のような手順でおこなわれる。

①テープに書かれている情報にしたがって子供の機械を作る。②テープ自体の複製を子供の機械の右側の特定の場所に作る。③子供の機械に始動パルスを入力する。

はじめに与えられたテープに自分自身の設計図が書かれているとすれば、これによって機械は自己増殖をつづけていくことになる。子供を作ったあとの機械は沈黙してもよいし、別の仕事をするようにしてもよい。

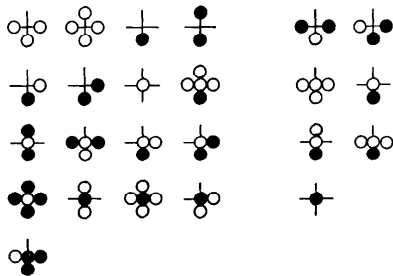
3. 3 状態モデル上の自己増殖機械

3.1 3 状態のセルオートマトン

ここでは3つの状態を空白（休止状態）、○、●であらわし、セルを区切る正方形の枠は書かないこととする。1クロック後に中央のセルが休止状態とならない近傍の形は図-14 に示す 24 通りである。ただし、このセルオートマトンには特別な向きや方向はないので、回転や鏡像をとったりした近傍形でも同じ遷移規則にしたがっている。

3.2 基本動作

このセルオートマトンでは信号は図-15 に示すパル



次が○となる近傍の形 次が●となる近傍の形

図-14 3 状態セルオートマトンの状態遷移規則

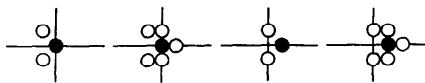


図-15 パルスの伝播

スによって伝えられる。このパルスは2つの形を交互にくり返しながらか2クロックで1セル前進する。パルスは何もない（休止状態でみちている）空間を自分の力で前進するので、信号線を作らずにすみ、したがって信号の交差の問題は発生しない。

パルスと静的なパターンあるいはパルスとパルスとの相互作用のようすを図-16 に示す。この図では途中

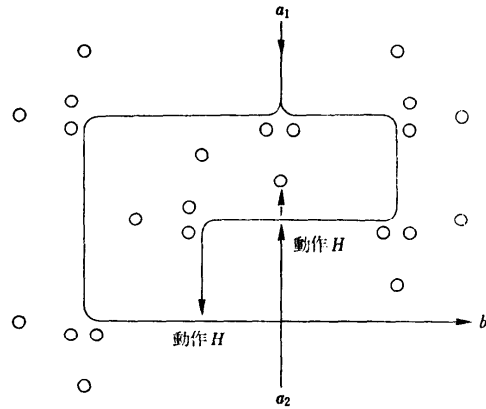


図-17 AND 回路

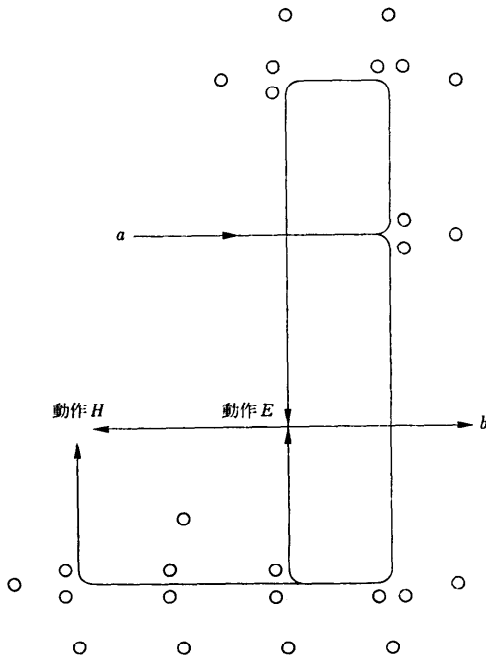


図-18 パルス発射回路

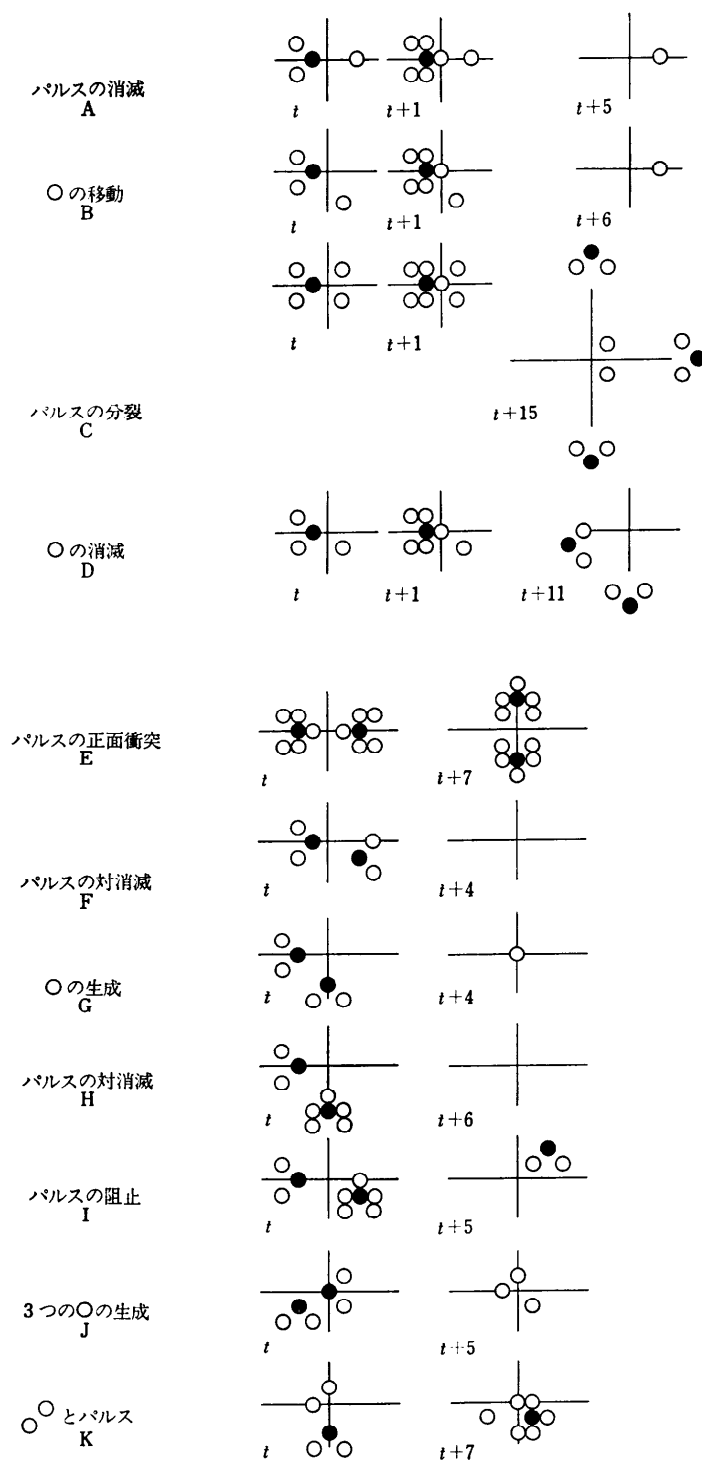


図-16 パルスとパターン, パルスとパルスの相互作用

の過程は省略されている。自己増殖機械を構成するのに必要な動作はこれですべてである。

安定状態になるまでの変化が最も複雑なのが動作Cの分裂の場合である。ここに出てきた○2つからなるパターンはパルスを分岐させたり、パルスの方向を変えたりする。また、この動作ではパルスが8セルを進むのに15クロックしか掛っていない。これにより、任意時間の遅れ回路を作ることができる。

3.3 基本回路

AND 回路を図-17に示す。 a_1 に入力したパルスは分裂したあと自分自身と衝突して対消滅する。しかるべきタイミングで a_1 と a_2 とに同時に入力があった場合には、 a_1 のパルスの一方を a_2 が消去し、もう一方のパルスが b に出力される。

回路を構成する素子が何も無い空間にパルスを乗せるのが図-18の回路である。2つに分裂したパルスは正面衝突して 90° の方向の2つのパルスになり、その後一方のパルスは別のパルスにより消去される。この回路をOR回路として使うこともできる。

図-19はフリップフロップである。 a_+ の信号は2つに分かれ衝突して○を作る。さらに a_+ に信号を加えても何も起こらない。 a_- の信号はこの○を破壊して b にパルスを出力する。さらに a_- に信号を加えても変化はない。結局この回路はSR-FFとなるが、

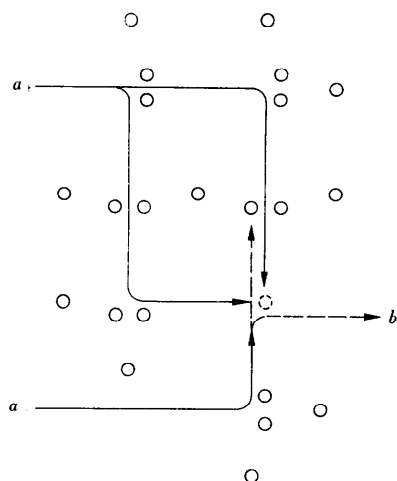


図-19 フリップフロップ

図-8のものとは出力の形態が異なっている。ただしこのことは状態器官SOのようなものを作ることをのさまたげにはならない。

3.4 自己増殖機械

3状態セルオートマトン上の自己増殖機械の全体図を図-20に示す。この機械の構成は von Neumann のものとほとんど同じである。実際、CU と MC の動きはまったく同じであり、同じような信号体系と状態器官SOとでできている。

主な違いは腕とテープにある。この機械は左右に動く腕Xと上下に動く腕Yと2つの腕を持っている。この2つの腕はCUからのパルス系列によってコントロールされ、腕を伸縮したり、パルスを発射したりする能力を持っている。腕自体は2つの○である。腕を制御するパルス系列は多数のパルス発射回路が発生する。その一例を図-21に示す。

子供の機械を作るには、2つの腕からパルスを発射し、それを衝突させて○を作る方法による。この方法では分裂回路(○ ○)を直接作ることができないので離して作った○を移動する方法をとる(図-22)。また、遠くの部分から作らなければならないので、自己増殖機械はテープの複製を最初にする必要がある。

テープの読み書きには腕と同じものを用いる。テープ上の記号は6セルおきに書かれており、○が1を、

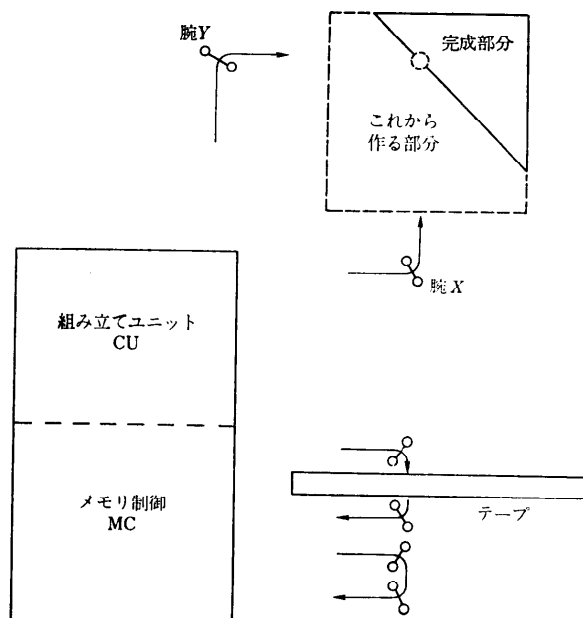


図-20 状態モデル上の自己増殖機械

パルスを α に衝突させ、左にパルスを出す。反射してきたパルスはもう1つのパルスで消去する。

3つのパルスを使って3つの \bigcirc を作る。

\bigcirc を移動する。

3つのパルスで \bigcirc を作る。

2つの \bigcirc を1つの \bigcirc に作りかえる。

β の \bigcirc を2つ前進させる。

もとの状態。

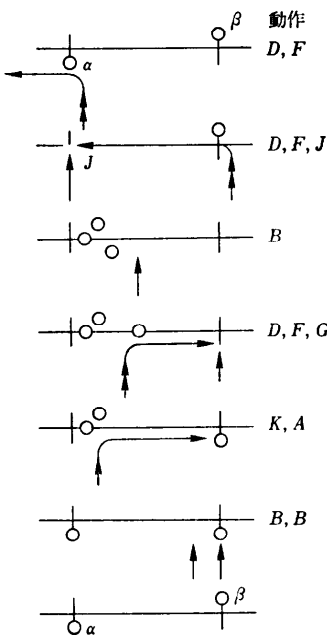


図-21 腕からパルスを発射する

休止状態が0をあらわしている。テープを読むにはそのセルにパルスを当ててみればよい。パルスが通過す

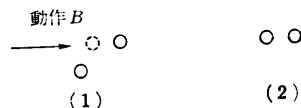


図-22 分裂回路を作る

れば0であり、パルスが止まれば1である。1の場合を決定するために、もう1つ空のテープを用意し、そちらの信号を利用している。テープの読み書きの具体的な方法は複雑なのでここでは省略する。

参考文献

- 1) von Neumann, J.: Theory of Self-Reproducing Automata, ed. Burks, A. W., p. 388, University of Illinois Press, Urbana, Illinois, (1966).
- 2) Codd, E. F.: Cellular Automata, p. 132, Academic Press, New York (1968).
- 3) Banks, E. R.: Universality in Cellular Automata, IEEE 11th Annu. Symp. Switching and Automata Theory, pp. 194-215 (1970).
- 4) 芹沢照生: 最小の万能セル空間[1], 信学技報, AL 77-26, pp. 1-10 (1977).

(昭和59年10月12日受付)