

大学院論文輪講資料 Nov. 28 '69

学習機械について No. 1

Cellular Automata の場合

斎藤(正)研 M I 中所武司

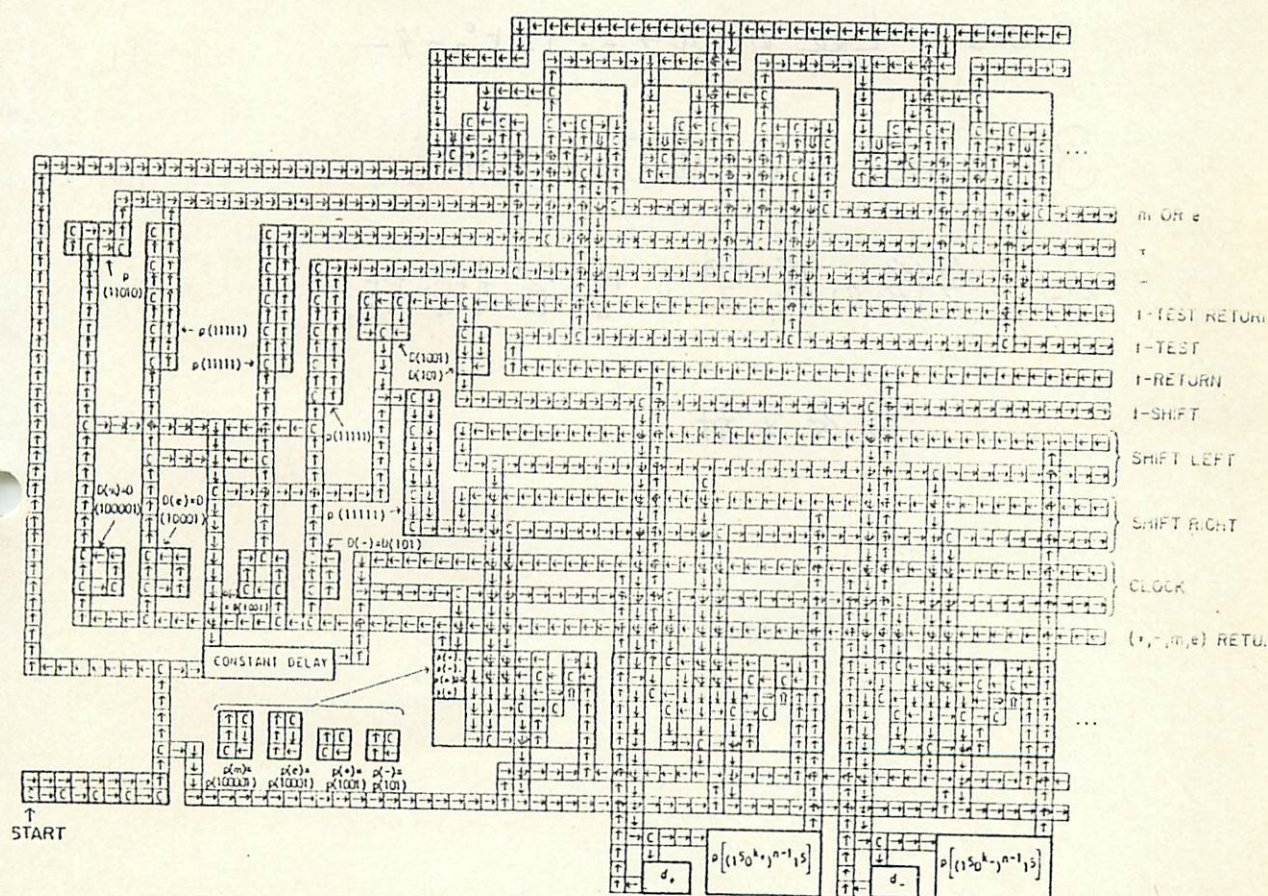


Fig. 0 The cellular computer.

目次

1. セルラー・オートマトンの歴史 1

2. 29-state のモデル

2.1 状態及び遷移法則 3

2.2 Neumann の機械 7

2.3 Lee のセルラー・コンピューター 11

3. Codd の 8-state のモデル 13

4. 今後の展望と学習機能 17

参考文献

1. セルラー・オートマトンの歴史

von Neumann は 1940年代後半にオートマトン理論を展開しはじめ、特に人間の神経系或いは巨大なコンピュータに興味を持ち、自己増殖の問題を提出した。彼は自己増殖のモデルとして、動的モデル、セルラーモデル、ニューロンを一つの有限オートマトンと考えた励起閾値疲労モデル、ニューロンの興奮、閾作用、不応期の特性を支配する偏微分方程式に基礎をおく連続モデルなどを考えたが、1952年から1953年にかけて、このうちセルラーモデルを発展させることにより、彼自身の、オートマトン理論における主要問題である、可能性、構成可能性、自己増殖、進化などについて、ある程度解決できた。

彼の考えたセルラーオートマトンは次のようなものである。正方形のセルで無限に満されたセルラー平面を構成する各セルは、すべて同じ有限オートマトンで、その状態数は29、そのネイ(neighborhood; 一つのセルに直接影響を与えるセル)の数は上下左右の4コと自分自身、そして、時刻 $t+1$ のセルの状態は、時刻 t における5コのネイの状態と遷移法則によって決まる。そして、この有限オートマトンは、静止状態 Q を持ち、この無限のセルラー平面は、常に、有限個のセルを除いて、すべて、この Q の状態にある。というものである。しかし、Neumann は 1957年に、この29-state

のモデルを複雑化させる前に、弱昇53才で世を去った。

その後、この理論の展開はあまり急速には起らなかったが、1966年に A. W. Burks が Neumann の遺稿を編集して、製本化したことから、だんだん、この分野に興味を持つ人々が多くなってきた。

C. Y. Lee は Neumann の 29-state のモデルを、受け継いで、オーストラリアには、初歩的なコンピュータの構成を試み、オーストラリアには、論理設計の新しい方法を示そうと試みた。彼の見解では、現在あるような素子で実現した場合には、経済的問題があり、またコンピュータとしても、幼稚なものになるので、この分野が工学として、確立するためには、新しい素子を必要とするようである。

一方、E. F. Codd は Neumann の 29-state のモデルを出発点として、それを発展させていくような方法をとらないうて、J. W. Thatcher が新たに作成した定義や形式を利用して、Neumann のモデルより、もっと簡単なものを研究した。ネイの数は Neumann と同じ 5 コトとして、2-state のものから始めた。そして、ネイの数を増加するより、state の数を増加するほうが、良好な結果が得られることがわかり、結局、8-state, 5-ネイのセルラーオートマトンには Neumann の 29-state, 5-ネイと同じ計算及び構成の操作ができる上に、それ以外の能力も備えることがわかった。

また、Neumann の 29-state のモデルでは、状態の

変化は、時間によらなかったが、J. H. Holland は、時間によつて、状態が変化するものを考えた。

2. 29-state のモデル

2.1 状態及び遷移法則

静止状態 U 。これは セルラー平面の大部分を占める不活動な状態。

伝達状態 $T_{u\alpha\epsilon}$ 。これは、この状態の入力方向のネイ、この方向に出力をもつ興奮した伝達状態のセルがあれば、1時刻遅れて興奮する。但し、 $u=0$ は一般伝達状態、 $u=1$ は特殊伝達状態、また α は出力の方向を表し、 $\alpha=0, 1, 2, 3$ はそれぞれ、右へ、上へ、左へ、下へを表す。また $\epsilon=0$ は抑制、 $\epsilon=1$ は興奮を表す。

分岐状態 $C_{\epsilon\epsilon'}$ 。この場合は、すべての方向が、入力、出力のどちらにもなるが、同時に両方にはならない。そして、この状態は、この方向に出力をもつすべての伝達状態のネイセルが興奮したとき、2時刻遅れて興奮して、次に、このセルの方向に入力をもつ一般伝達状態のネイセルは1時刻遅れて興奮する。ここで $\epsilon=0, 1$ はそれぞれ、現在、抑制、興奮の状態にあることを示し、 $\epsilon'=0, 1$ はそれぞれ、次の時刻に抑制 或いは 興奮になることを示している。

感光状態 S_{Σ} 。この状態は入力があったときも、なかったときも、1時刻遅れて、次の状態に変わる。そのプロ

セスは Fig 1 に示す。

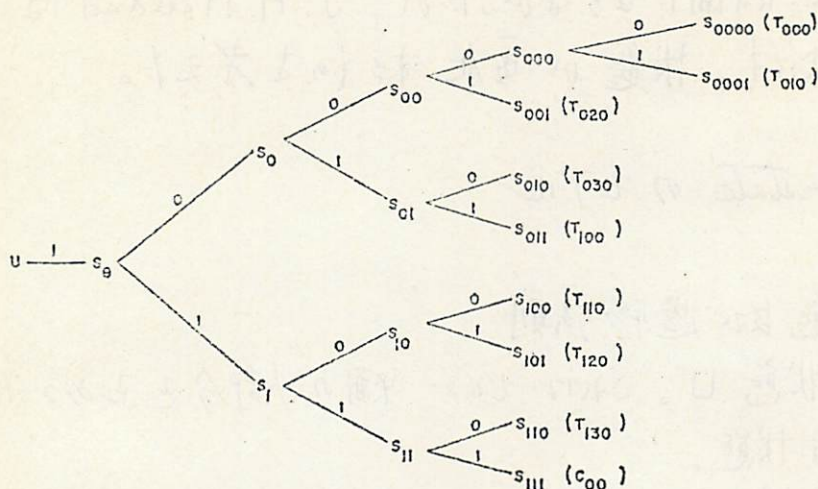


Fig-1

Succession of states in the direct process

先の分岐状態の遷移法則を

Fig-2 に示しておく。

そして最後に、キリングの法則がある。Tode または Cee' の状態のとき、Tide からの入力がある時、または Tide の状態にあるとき、Tode からの入力がある時には、

その状態のセルは、静止状態 L になる。

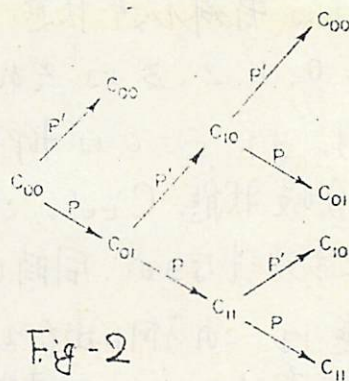
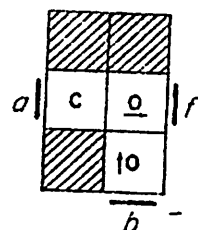
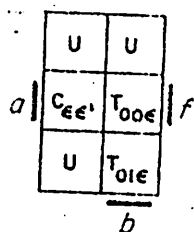


Fig-2

以上、静止状態 L, 伝達状態 Tode, 感受状態 S, 82 で合計 29 の状態が示された。遷移法則も、以上にすべて述べたが、キリングは他のどの法則よりも優先して行使される。

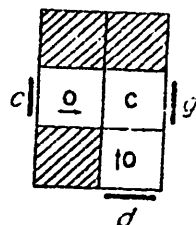
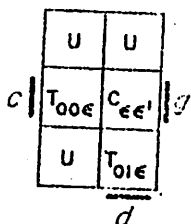
次に、2, 3 の例を掲げておく

Fig-3の(a)は
 $f(t+3) = a(t) + b(t+1)$
 で、 $C_{ee'}$ が2時刻遷延
 素子、 T_{00e} がOR素子と
 使われている。



(a) Realization of $f(t+3) = [a(t) + b(t+1)]$

(b)は $g(t+3) = c(t)d(t)$
 で $C_{ee'}$ がAND素子
 として使われている。



(b) Realization of $g(t+3) = [c(t) \cdot d(t)]$

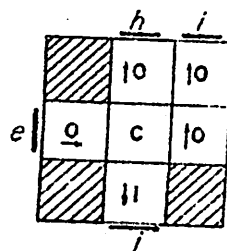
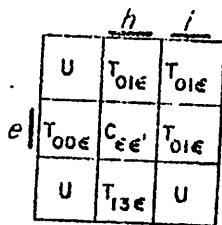
また(c)では

$$h(t+4) = e(t)$$

$$i(t+5) = e(t)$$

$$j(t+4) = e(t)$$

で、 $C_{ee'}$ が配線分岐
 及び、一般刺激の
 特殊刺激への変
 換にも使われている。



(c) Conversion of ordinary stimuli into special stimuli by confluent states, and wire-branching

Fig-4は Fig-3 Illustrations of transmission and confluent states

Fig-1に示した感光状態の変化の例である。これは、
 時刻の経過について、興奮の伝わる様子、及び感光状
 態の変化するようすがよくわかると思う。

次にFig5では少し複雑だが(a)と(c)を比べると
 わかるように、入力から遠くにあるセル(D3)を、Fig-1の
 プロセスで変化させてUから $C_{ee'}$ にする例である。こ
 こでは、セルの状態を見やすくするため、表示の仕方を

かえて、伝達状態については、出力方向を矢印で示し、一般伝達状態のときは、矢印の傍に0、特殊伝達状態のときは、矢印の傍に1をつけて表している。従って、例えば、

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₁₀	T ₀₀₀	U
2	T ₀₁₀	T ₀₂₀	Time 0	

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₀₀	T ₀₀₁	U
2	T ₀₁₀	T ₀₂₁	Time 1	

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₀₀	T ₀₀₀	S ₀
2	T ₀₁₁	T ₀₂₀	Time 2	

	A	B	C	D
1	T ₀₀₁	C ₀₀	T ₀₀₀	S ₀
2	T ₀₁₀	T ₀₂₀	Time 3	

T₀₀₀ は $\rightarrow$ となっている。この図の下に入力系列が示されているが、この場合は、入力からの刺激と

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₀₁	T ₀₀₀	S ₀₀
2	T ₀₁₀	T ₀₂₀	Time 4	

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₁₀	T ₀₀₀	S ₀₀₀
2	T ₀₁₀	T ₀₂₀	Time 5	

入力からの刺激では、(B2)のセルに到着するまでに2時刻の遅れがあるために、図の入力系列

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₀₀	T ₀₀₁	T ₀₀₀
2	T ₀₁₀	T ₀₂₁	Time 6	

	A	B	C	D
1	T ₀₀₀	C ₀₀	T ₀₀₀	T ₀₀₁
2	T ₀₁₁	T ₀₂₀	Time 7	

の有用部分がこれとよって2時刻分重なったり、離れたりしている。

Fig-4

Illustration of the direct process

まず入力のはじめの10000は(B2)を $\rightarrow$ に変え、次の10000は(C2)を $\rightarrow$ に変え、次の1010が(D2)を $\downarrow$ に、次の1111が(D3)をC₀₀に変える。ここで入力からの最初の1が(B2)をUに変え、次の1011が(B2)を $\rightarrow$ に、次の1が(C2)をUに、次の1011が(C2)を $\rightarrow$ に、次の1が(D2)をUに変える。再び、ここで入力に戻って、最初の1が(B2)をUに、次の10000が(B2)を $\rightarrow$ に、次の1が

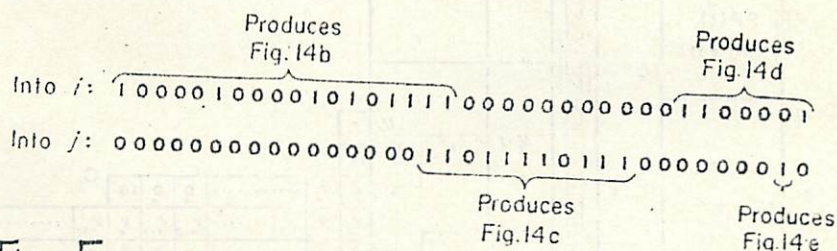
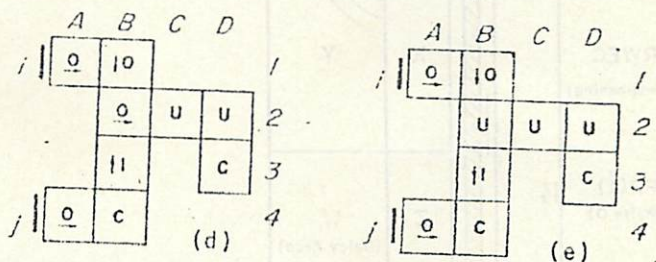
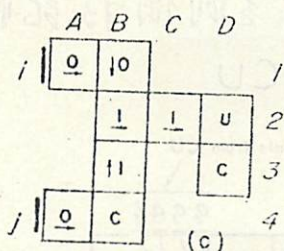
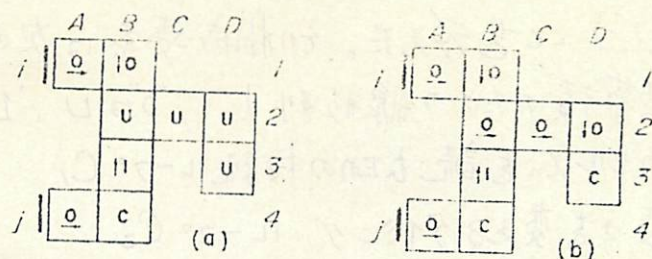


Fig-5

Procedure for modifying a remote cell and returning the constructing path to its original unexcitable state

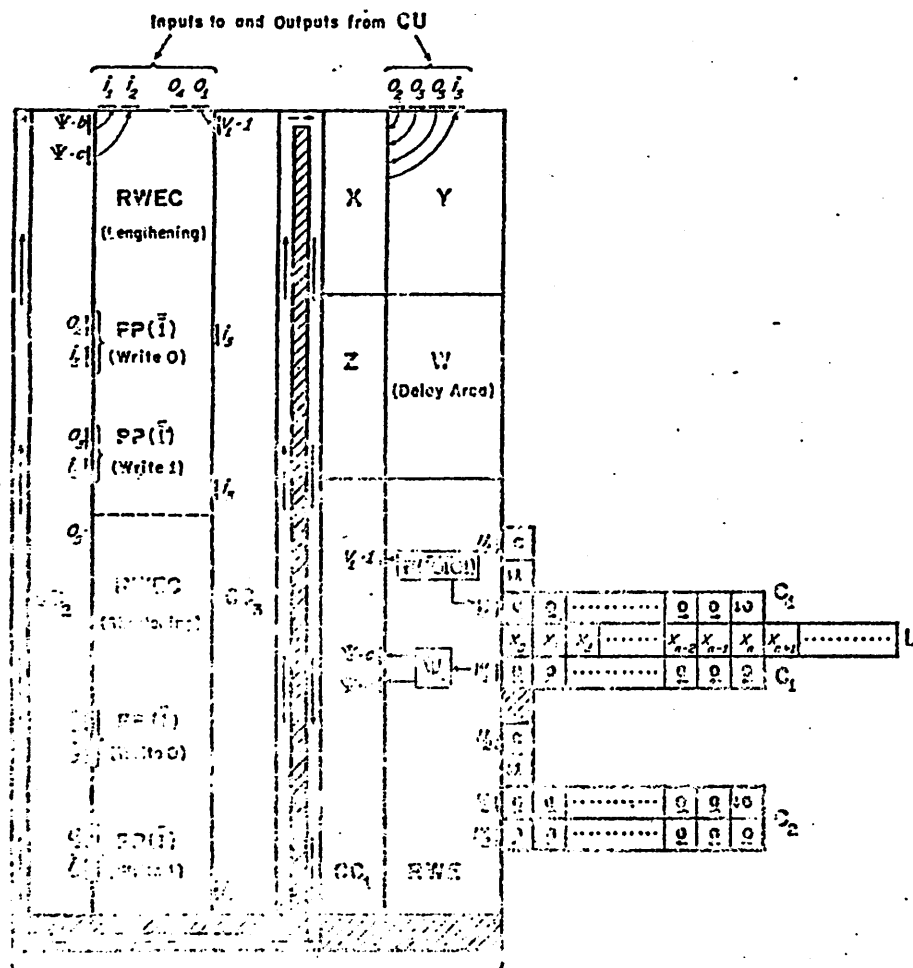
((2)をUに変える。こゝでまたj入力に戻って、10 (B2)をUに変える。以上で操作は完了する。

2.2 Neumann の機械

Neumann は無限に拡張可能なテープと、その制御を、先に述べた セル空間の中には、Fig-6 のような形

で埋め込むことを考えた。その構成要素は次の5つである。

- (1) 情報蓄積のための線形列 L ; '0'は $\sqcup$, '1'は $\downarrow$
- (2) 任意のセル x_i を読むための接続ループ C_1
- (3) C_1 の長さを変えるタイミングループ C_2
- (4) L, C_1, C_2 の操作を制御する記憶制御部 MC
- (5) MC を制御する CU



Memory Control MC

Fig. 1

This unit with unlimited memory capacity.
Note: the various organs and units are not drawn to scale.

この部分の機能は読み書き及び C_1, C_2 の伸縮の、どのように行われるかを追って行いながら説明しよう。

まず第一段階は、CUはMCに read 命令を送り MC は X_n を読み、結果を CU に送る場合である。

CU $\xrightarrow{O_1}$ RWEC $\xrightarrow{V_1}$ CC₃ (パルサーで符号化) — 主軸=ネル —
— CC₁ (デコーダーで復号) $\xrightarrow{V_1}$ RWE

RWE に入った信号はパルサー P(10101) を刺激し、110110101 は V_1 で C_1 に入り、上部を通って X_n に11たさ。もし X_n が 11 なら、これを 10 に変えて、1 を W_1 に送る。もし X_n が 10 なら、10101 はそのまま、 W_1 に出てくる。この W_1 からの出力は RWE の 1:10101 判別機 Ψ_1 によって、出力が 1 ならば Ψ_b に、出力が 10101 ならば Ψ_c に出力がでる。その後は

Ψ_b の出力 — CC₁ (符号化) — 主軸=ネル — CC₂ (復号) $\xrightarrow{\Psi_b}$
— RWEC $\xrightarrow{L_1}$ CU

Ψ_c の出力 — CC₁ (符号化) — 主軸=ネル — CC₂ (復号) $\xrightarrow{\Psi_c}$
— RWEC $\xrightarrow{L_2}$ CU

以上で第一段階は終りである。

次に第二段階は、CU は write 命令と C_1, C_2 の伸縮命令を、MC に伝え、MC はそれを実行して、CU に終了を知らせる。

CU からの出力は write 命令が "0" なら O_2 から、"1" なら O_3 から、また C_1, C_2 を延長するなら O_4 から、短縮するなら O_5 から MC へ入る。

O_2 からの信号 — Y — X (符号化) — 主軸=ネル — CC₂ (復号) —
— RWEC

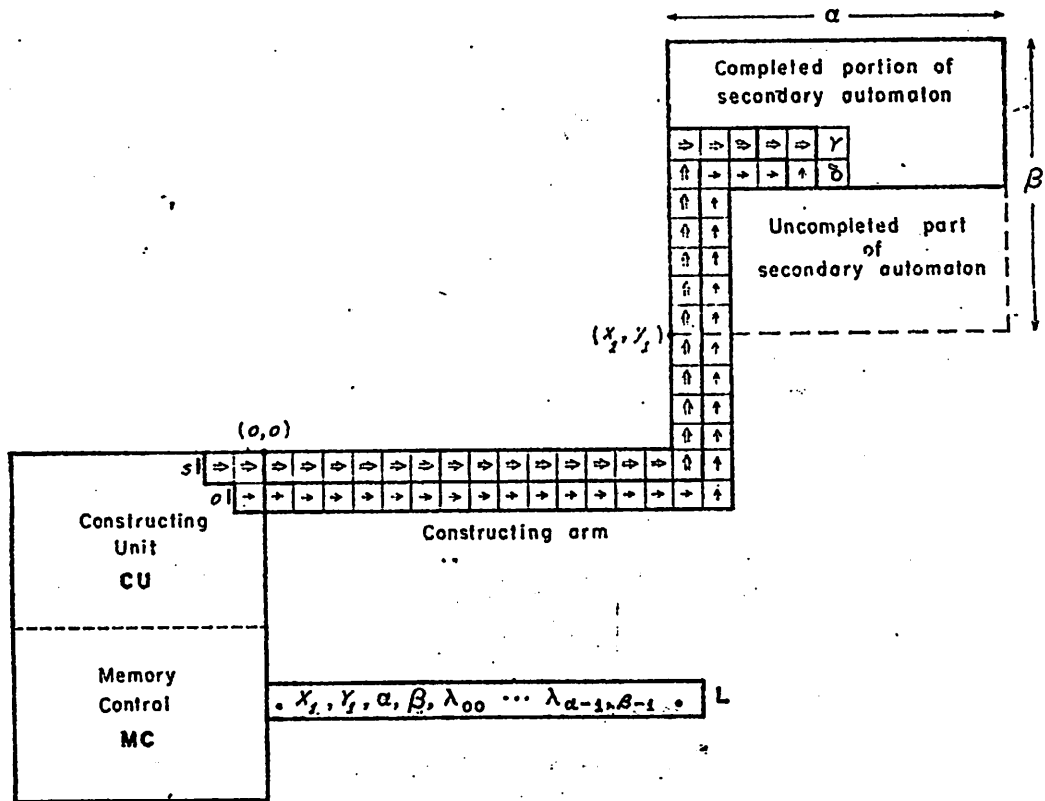
RWEC に入った信号は、その中にある繰返しパルサー PPC(1)

を011にする。03からの信号も同様である。

一方、04からの信号は RWE C に入り、制御器官 C0₁ を011にする。RWE に命令指示後、011になり、次の制御器官 C0₂ が011になる。以下 C0₃, C0₄ とつづき、その後 write 命令が "0" なら、C0₅, C0₆ とつづき、"1" なら、C0₇, C0₈ とつづく。そして C0₆ また C0₈ が011になると、その信号により 先の PPC1) を011にして、操作終了を CUI に伝える。05からの信号の場合も同様である。

以上で第2段階は終りである。

なお、上の説明でわかるように RWE は読み書き消去担当部分で、RWE C は RWE の制御を行う。また RWE C は



Universal Constructor

M_C

Fig-7

Operation of the constructing arm

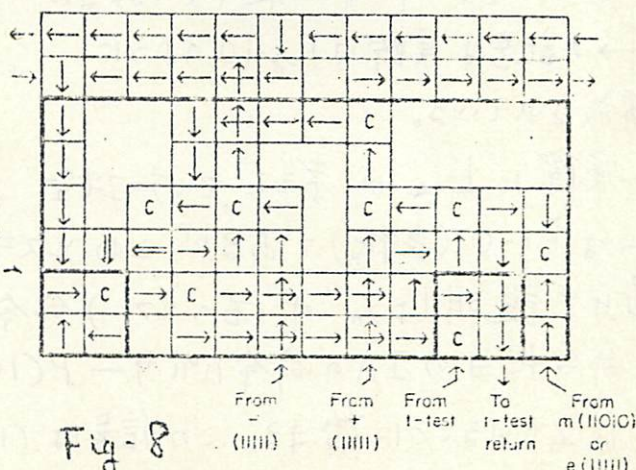
制御器官 CO を 16 ユート。

Fig-7 は 以上を示した機能をもつ 万能工作機械の線形列 L に記憶にある情報に従って、2 世オートマトンを作っていることは 3 である。

2.3 Lee の セルラー・コンピュータ

Lee の考えたシステムは、Turing Machine の基本的な枠にあたる。主な構成要素は、メモリ・アセンブリ MA と命令アセンブリ IA で、Fig-8, 9 のような構造になっている。これらの図の左下にある、4 コのセルから成るパルサーは 線形パルサー PP(1) で、このパルサーが 0 になっているときだけ アセンブリは活動状態にあり、入カに対して応答する。命令は 右へ (+), 左へ (-), 消去 (e), 記入 (m), 条件付ジャンプ (t(n)), 停止 (*) の 6 種類である。t(n) とは、現在走査中の MA の "1" ならば、第 n 番目の命令へジャンプし、その他は、次の命令を実行せよという命令である。

さて MA は、"1", "0" を記憶する場所で、その仕方は Fig-8 の右下にある、4 コのセルから成るパルサーが PC(101) か PC(1001) かによる。従って、e 命令入カ 11111 で PC(1001), m 命令入カ 11010 で PC(101) が構成される。+, - 命令 11111 がくると、PP(1) は 0 になり、活動状態は隣の



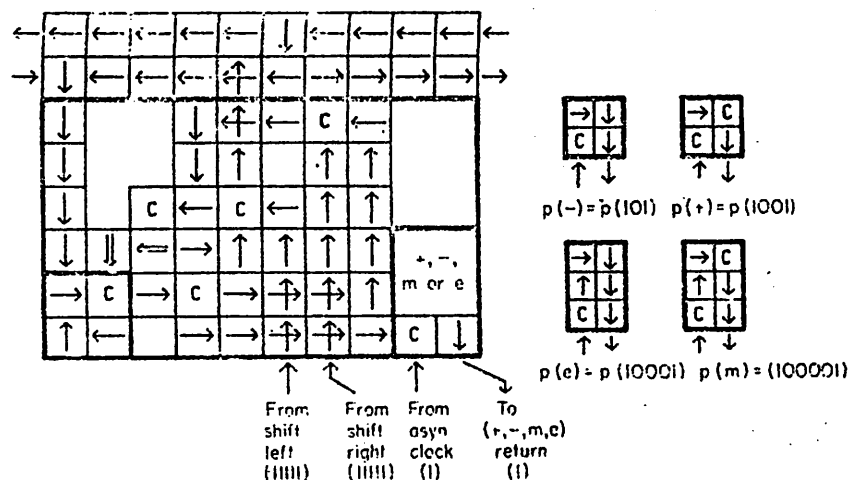


Fig-9 Nontransfer instruction assembly.

MAに移る。セ-testから入力のあったときは、現在、"1"か"0"かによって $P(101)$ または $P(1001)$ から出力101又は1001が放出される。

次にIAであるが、これはFig-9に示したように、+, -, e, mを担当するが、セ(m)を担当するものがあるが、ここでは後者の図は省略した。IAの右下に構成されるロジックは、Fig-9の右に示したように、IAが、+, -, e, mのどれを担当するかにより異なる。

なお、Leeは一般の特殊伝達状態を、それぞれ $\uparrow$, $\uparrow\uparrow$ で表している。また $\uparrow\rightarrow$ の記号は、実際はFig-10のように構成されている。

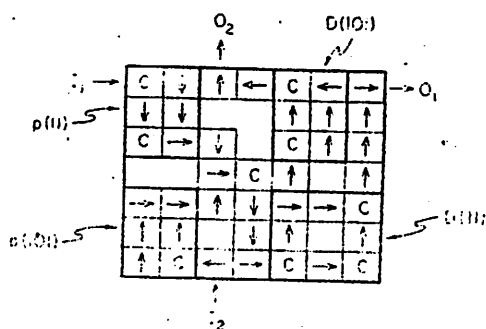


Fig-10 Crossover network.

実際にはLeeの考えたセルアーキテクチャであるが、このシステムの性能を例を掲げて説明しよう。+ (右へシフト) 命令の実行は、まず、+命令担当のIAの命令ロジック $P(1001)$ から信号1001が放出されることに始まる。この信号は(+, -, e, m) return channel

を通り、左の方にある4つのデコーダーへ送る。このうちD(1001)だけが出力信号を出し、この信号は3つの働きをする。オ1は、parallel-PPC(1111)を経て、+channelを経て、各MAの+入力へ入る。この時、活動状態(PPC1)がONにあるMAだけがこの信号を受け入れて、PPC1をオフにする。右隣のMAのPPC1をONにする。オ2は、shift-right channelを通り、活動状態にあるIAに入り、そのPPC1をオフにして、右隣のIAのPPC1をONにする。オ3は、constant delayを経て、非同期clock channelを経て次の命令をstartさせる。以上で(+)命令は終了である。

このシステムは、MA, IAの各々にPPC1があって、活動状態の移動が行われ、テープ走査のための機械的制約を、精密な中央制御装置が要する等の利点がある一方、Neumannのシステムに比べ、沢山のセルを使用する欠点があり、また、テープのコマに相当するものとしてMAを用いるので、Neumannの考えたセル一平面と異なり、1以外の状態が無数個あることになり、ここに大きな難点が残されていると思われる。なお、このシステムは、少し工夫すれば、状態数29個のうち16個で実現できる。

3. Codd の 8-state のモデル

彼は状態としては、構造状態 0, 1, 2, 3 及び信号状態 4, 5, 6, 7 の8を考え、0をNeumannの静止状態Uに対応させた。そして、信号の進む方向は、セル状態で決める。信号状態Sの後に、0をつけることで示した。Fig-11にT接合の例を示す。ここで“1”列は110スを表わし、“2”列は110スの

サヤで、これは、ハスの拡張、縮小、右折、左折等に役立つ。このハスは相方向性

なので、信号間の衝突が考えられるが、

ここでは、すべて消滅すると考え、唯、

T接続での衝突では、07×07→04

04×04→05, 05×05→06, 06×06→06

のような規則がある。この相方向性を単方向性にするために、Fig-12のゲートを使う。

偽07で、ゲート1ドが2→3となると012

となり信号は右へしか流れなく

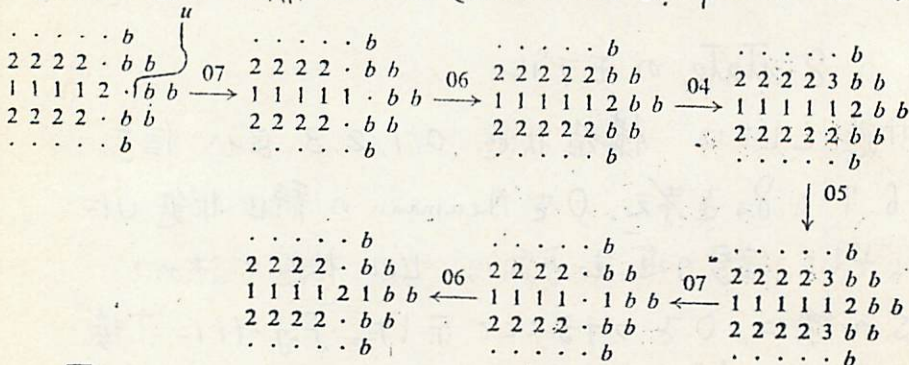
なり、06、07で3→2となり04となる。このハスの拡張はFig-13の

ように行なわれる。同様にハスの左右への拡張や縮小も定義されている。

Fig-14は書き込みの例で、この

他にも、消去、読み出しが定義されている。そしてこれらの機能を定義するために使用する遷移ルールは515コ+αにもなる。

さて、次に最終目標のUCC (universal computer - constructor)

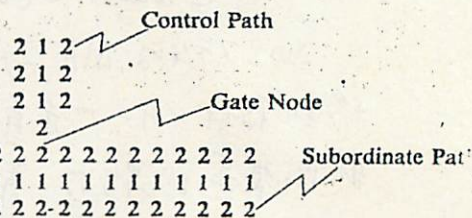


2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
1 1 1 1 1 1 1 0 s 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 1 2
2 1 2
2 1 2

2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
1 1 1 1 1 1 1 0 s 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 s 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 1 2
2 1 2
2 1 2

2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
1 1 1 1 1 1 1 0 s 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 0 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 s 2
2 1 2
2 1 2

Fig 11



のために必要な部品を示しておく。

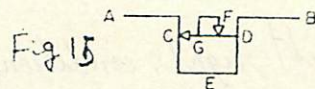


Fig 15

Permanent one-way lock.

Fig-15は一方向ロック, Fig-16は周期エミッタである。
最小周期は10 unit time である。

Fig-17は信号を07に変える信号変換器で、これは先に述べたようにゲートをONにする信号は07だけなので、よく利用される。

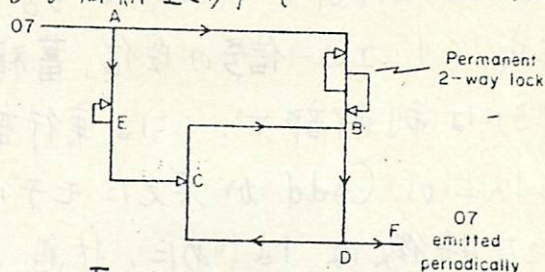


Fig 16

Periodic emitter.

Fig 18はスワッチの単方向パスの交叉点の部品である。この他に、

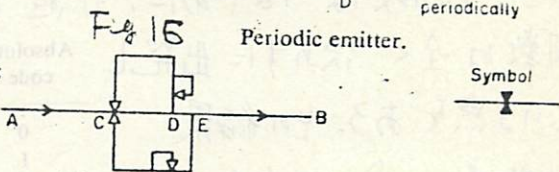


Fig 17

Signal transformer type 7.

二方向ロック, 456様式信号変換器, 相単方向パス交叉, エコー識別機, デコーダーなどがある。

Input	04	05	06	07
Output	07	07	07	07

このような部品を使って、

できたUCCは Fig-19 のようなものである。これは主に3つの部分からなり、オ-は記憶部

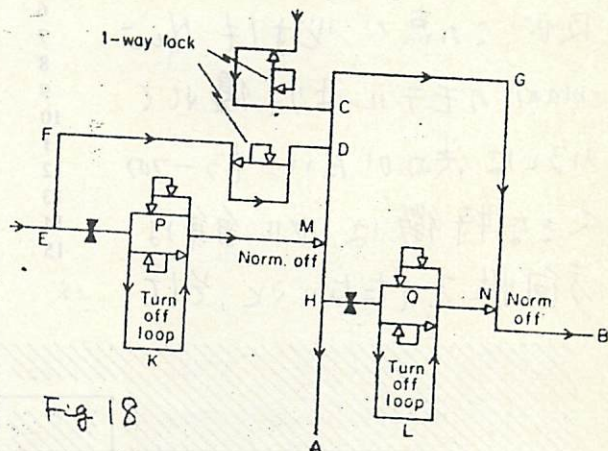


Fig 18

Crossover for two unidirectional paths.

で、テ-フ°, D, K, M, P から成

る。テ-フ°Mは、対応するPの部分から、4ビットから成る命令語の頭ならば"1", 他は"0"となっている。テ-フ°Kはジャ-フ°命令の実行の際、使用される。なお、このUCCに使用される命令語は Table-1 に示す。この命令語集合は H. Wang によって、1次元テ-フ°の Turing machine のために、必要十分な命令語 mark, erase, shift left,

shift right, conditional transfer の集合と等価である。

オ2には実行部で, (04, 05, 06, 07) からなる信号系列を作成したり, エコー信号の受信, 蓄積, 読み出しを行う。

オ3には制御部で, ニニは実行部の制御を司る。

以上が Codd が考えたモデルの概要であるが, この大きな特徴は, はいめに, 状態, 及びネイを定義して, 遷移関数は全く決めずに出発し

ている点がある。その結果,

状態数は8と少ないが,

遷移関数は515以上

及び, この点で, 必ずしも New-

man のモデルよりも優れて

いるとは決めたい。もう一つの

大きな特徴は, セル自身は

方向性をもたないこと, そして

Absolute code	Symbolic code	Operation
0	<i>z</i>	stop
1	<i>c</i>	select or block construction path
2	<i>d</i>	select or block data path
3		
4	<i>x</i>	extend
5	<i>xl</i>	extend left
6	<i>xr</i>	extend right
7	<i>r</i>	retract
8	<i>rl</i>	retract left
9	<i>rr</i>	retract right
10	<i>m</i>	mark if zero
11	<i>e</i>	erase if one
12	<i>t(k)</i>	transfer on mark
13		
14	<i>i</i>	sheathe (inject signal 06)
15	<i>j</i>	activate (inject signal 07)

Table-1

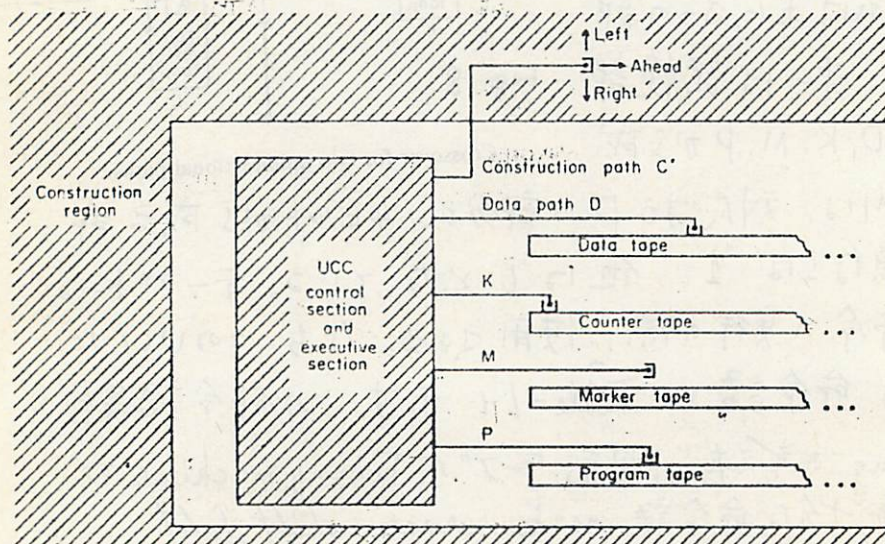


Fig-19

The universal computer-constructor and its construction region.

Neumann は信号としては興奮状態の移動を考えたが、Codd は信号状態を考え、それ自身の移動を考えたことである。その結果、Neumann や Lee のモデルでは、伝わっていく信号よりも、その系列に意味を持たせたために、符号器や復号器を多く要したのに対し、Codd では、伝わっていく信号そのものに意味を持たせているので、そのようなものはほとんど要らない。

4. 今後の展望と学習機能

Neumann, Lee, Codd のモデルは、先に見た如く、互いに相当異っており、三者三様で、堅実・辺倒の Neumann、技巧に溺れた Lee、倏約の過ぎた Codd と言えそうである。しかし、機能的な面から見るとどれも大差なく、(万能 Turing Machine + 自己増殖) の能力をもつ。

そこで、計算機として見た場合、Lee の指摘するように、今のディッツ・コンに比べ、幼稚なものになってしまうので、今後とも計算機を目的とした場合の将来性はあまりないが、このようなモデルの一属性として、計算能力が固われる場合は生きてくると思われる。即ち、例えば、計算能力として四則演算だけのできる人間と計算機ではその価値は異なる。計算機にとっては、四則演算能力は、自己の存在そのものであるが、人間にとっては、一つの属性でしかない。従って人間社会では、前者は、より高度の計算機によってその存在価値を失うが、後者は、それにもかかわらず、四則演算能力は、その存在価値を高めるのである。

では次に、自己増殖についてはどうであろうか。

これは、あらかじめのプログラムに従って、正確なコピーをつくる能力であって、そこに進化がみられないという限界性がある

けれども、例えば、あるシステムの一機能を受けもつ部分が破損したとき、それによって全体が破壊していく前にコピーをつくらせて死を免れるようなこと、或いは、手遅れの場合でも、自分の子供をつくらせて死ねとらうようなことがのできるのシステムの永久性がある。それは封建時代の身分制度による体制維持に似ていておもしろい。

しかし、このモデルは進化しない、或いは学習機能を持たないため、厳しい自然の中で生き抜くには、あまりに致命的な欠陥と言える。そこで、このモデルの学習機能の可能性を試みよう。

「学習」ということが明確になっていない段階で、学習機能を云々するのは、はじめから無理があるが、もし、生物における学習がニューロンによるものだとすれば、このニューロンの機能は、現在わがっている限りでは、この有限オートマトンセルでモデル化できるので、このモデルが、将来、学習を行うようになる可能性はあると思う。また、状態の遷移関数に確率を導入して、お程度の不確かさを与えると、自己増殖の過程で、多くの不良品(退化)に混って、進化した子孫が生まれる可能性がある。しかし、現段階では、そのメカニズムにまで立入って学習機能を云々することは避けたい。

参考文献

1. von Neumann, J., "The Theory of Self-reproducing Automata" ed. A. W. Burks. Univ. of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1966
2. Lee, C. Y., "Synthesis of a Cellular Computer" in "Applied Automata Theory" ed. J. T. Tou. Academic Press, 1968
3. Codd, E. F., "Cellular Automata" Academic Press, 1968