

アナログ記憶マトリクスとその応用

三菱電機KK鎌倉製作所* 阪 尾 正 義

まえがき

「柱のキズはおとしの五月五日の背くらべ」と童謡にも歌われるようにアナログ量を記録し保存しておくという概念は日常生活においてしばしば利用される。リセット作用のある体温計、プリセットできる目覚時計、更には、固定記憶としての写真などすべてアナログ記憶現象を伴った道具と云えよう。その他、高級な計算機と云われる人間や動物の神経系などにおいてもアナログ記憶とみなすことのできる機能や作用が存在する。

一方、エレクトロニクスの技術分野をふりかえってみると、デジタル計算機の発達に伴ってデジタル量の記憶技術にはめざましい進歩があったが、アナログ記憶技術には画期的な進歩は無かったと云えよう。それには電氣的にアナログ量を記憶する適当な素材が得られなかったことがもっとも大きい原因となっていると考えられる。

ところが、人間の作業を機械に置き換えようとする時代のすう勢は従来のデジタル技術による機械ではもはや満足できなくなり、新しい形の情報処理装置が要望されるに至った。Neuron Model とか Self-Organizing System といった人間や動物の神経系の情報処理様式を模擬した電気回路系の研究が活発に行なわれるようになったのはその一つの現われである。これらのシステムの著しい特徴は組織の一部がアナログ的な情報処理を行ない、

しかも、このアナログ要素は同時に記憶作用を伴っていることである。

アナログ記憶をいかして実現するかは今後の課題の一つであるが、性能や価格の点で適当なものが入手できるようになった場合のことを想定すると、従来の技術とは全く異なった電気回路や計算機が誕生する可能性もあって、期待する所のものは非常に大きいと云える。

本稿はアナログ記憶の必要性や応用分野について考察を加えるとともに角形ヒステリシスループを持つ磁心によって得られたアナログ記憶特性についても述べている。

アナログ記憶の素材

コンデンサによってアナログ電圧を一時的に記憶する方法はアナログ計算機などで従来から利用されてきたがコンデンサやその周辺のスイッチ回路には必ず漏洩電流が存在するので、この方法によるアナログ記憶はせいぜい数時間の範囲内に限られる。ボリュームやバリコンなども一種のアナログ記憶装置であるが記憶内容を電気信号によって変更できるためにはモータなどが必要になり装置としては容量的にも価格的にも莫大となり別な問題が生ずる。本稿で目的としているアナログ記憶は単なる回路素子として入手できる必要があり、その条件として半永久的な記憶特性、小型、安価、ランダムアクセスであることなどが要求される。

もともと純粋な電気系では機械系でみられるようなクーロン摩擦や表面張力に相当する現象が存在しないために電気量の永久保存は原理的に不可能である。そこで電気信号によって容易に状態が変化するような物理現象や化学現象にアナログ記憶の作用をゆだねねばならなくなるが、この場合でも記憶の内容が電気信号として容易に読出し得ることが重要な要件となる。現在、このような要件を満たし得るアナログ記憶のための素材として、強磁性体、強誘電体、および電気化学現象を用いた要素などが開発されつつある¹⁾。

強磁性体によるアナログ記憶は、磁心の磁束レベルが連続的に変化し、しかも、各レベルにおいて磁束は半永久的な記憶特性があることを利用したもので、図1はその様子を図示したものである。磁心を用いたアナログ記

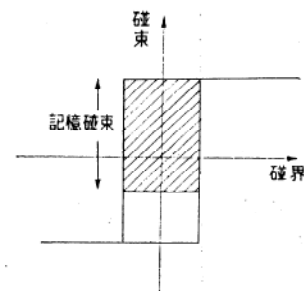


図1 角形ヒステリシスループの磁束レベル

* 神奈川県鎌倉市上屋町325・計算技術部

憶はデジタルコア記憶における技術の発達があったために現在ではもっとも開発が進んでいて、たとえばマトリクス状に配列して電流一致方式の磁心撰択を行うこともできる。

強誘電体においてもチタン酸バリウム結晶やトリグリシンサルフェートなどは角形ヒステリシスの誘電特性を持っているので強磁性体の場合と同様に誘電束を用いてアナログ量の記憶が実現する。この方法によると、小形、安価に製造できる利点をもっているほか、最近では半導体素子と組合わせ、半導体の抵抗値をコンデンサの分極電荷によって制御できる可能性もあると云われている²⁾ 現在の所は実用段階に達していないが上のような利点によって非線形コンデンサは将来のアナログ記憶の有望な素材の一つであると云えよう。

電気化学現象を用いたアナログ記憶は電気分解あるいは電解析出の作用が流通する電荷量に比例するとうフアラデーの法則を利用したものである。ソリオン³⁾、電解積分器⁴⁾もその一例であるが、Windrow⁵⁾等の発表による Memister は注目に値するアナログ記憶素子である。Memister の1例は、図2に示すよう A, B, C の3

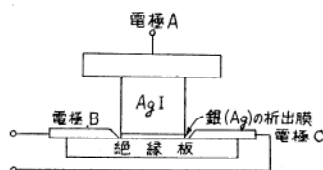


図2 Memister の構造

個の電極を持っていてAとB, Cの電極の間には固体電解質 AgI が介在している。BとCの電極は絶縁板の上に取付けられているが、AとB, C電極の間に制御電流が流されると、絶縁板上に銀が析出し、B, C電極間の導電度は制御電流の時間積分値に比例して変化する。この現象は制御電流の方向によって可逆的に変化し、その分解能は1000ステップ、抵抗値の変化は $0.02 \sim 0.2 \Omega$ 、制御電流の大きさは約 $100 \mu A$ と云われている⁶⁾。

磁心アナログ記憶素子

磁心を用いたアナログ記憶ではアナログ量は磁束レベルの形で記憶されることは図1で述べたが、この磁束レベルを非破壊で読出すことは決してやさしいことではない。磁束レベル読出の方法は種々な方式のものが提案されているが⁷⁾⁸⁾⁹⁾その1つは磁心に微少な高周波電流を加え、この時、巻線に発生する電圧の2倍周波成分を読取る方式である¹⁰⁾¹¹⁾。

図3はその基本回路を示したもので角形ヒステリシスを持つ2個の磁心に共通に 100KC 程度の励振磁界が加

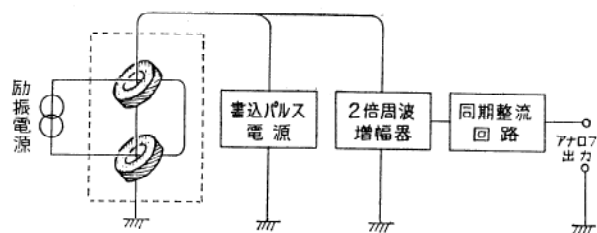


図3 倍周波形磁心アナログ記憶の基本回路図

えられる。読出側の巻線は2個の磁心で互いに逆直列接続されているので読出回路に発生する電圧は基本周波成分については2個の磁心で互いに打消される。しかし2倍周波成分については互いに相加わる電圧となり、増幅器の入力信号となる。磁心の特徴としてこの2倍周波成分は磁心の磁束レベルがヒステリシスループの中央にあるときは振幅は零で、正負の飽和領域に近づくに従ってほぼ直線的に振幅は増大する。2倍周波成分の位相は、磁束レベルの正負に従って 180° の位相差があるのでこれを位相整流することによって記憶量の極性判別も可能である。励振磁界の振幅は磁心ヒステリシスループの抗磁力 H_c に較べて小さい値を取るときは磁束レベルは変化しないので非破壊の読出が実現する。

記憶内容を変更するために磁束レベルを変更する必要がある場合は読出巻線に書込用の電流が加えられる。通常この書込電流はパルス状に加えられるので磁束レベルは階段状に変化することになる。

アナログ記憶マトリクス

磁束レベル変更用の書込電流の大きさは励振磁界が無ければ磁心ヒステリシスループの抗磁力に相当する電流を必要とするが、励振磁界が存在する場合は抗磁力の20~30%に相当する電流にまで減少する。いま書込電流の大きさをたとえば抗磁力の $\frac{1}{2}$ 程度に相当する電流とすると、磁束レベルが変化するためには励振磁界と書込電流とが同時に加えられねばならないことになり、この特性は裏を返せばデジタルコア記憶のように電流一致式の磁心撰択が可能なマトリクスが構成できることを示唆している。

図4は典型的なアナログ記憶マトリクスの構成図である。スイッチ $(X_1 X_2 \cdots X_m)$ は高周波の励振用電源に接続され、スイッチ $(Y_1 Y_2 \cdots Y_n)$ は読出用増幅器または書込用電流源に接続される。任意の磁心を選択して書込または読出を行うには $\{(X_1 X_2 \cdots X_m), (Y_1 Y_2 \cdots Y_n)\}$ のうちの1組のスイッチを操作することによって目的を達することができる。

いま i 行, j 列にあるアナログ記憶要素の記憶内容を ω

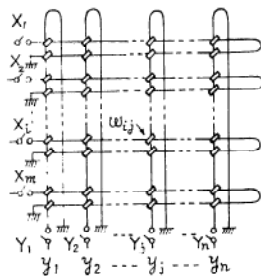


図4 マトリクス構成図

ij , スイッチ X_i ($i=1\sim m$) が ON である状態を $X_i=1$, OFF の状態を $X_i=0$ で表わすことにすると, 読出端子 Y_j に発生する出力電圧 y_j は

$$y_j = \sum_{i=1}^m \omega_{ij} X_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。つまりスイッチ $\{X_i\}$ の ON, OFF 状態は一つのバイナリーパターンを形成し, このパターンがマトリクスの入力信号となる。この時アナログ記憶マトリクスは入力 $\{X_i\}$ に対す乗算とその和を並列的に演算し, その結果 y_j を出力信号とす動作を行う。高周波励振源として基準の周波数と $\pi/2$ だけ位相の異なるものを用意し, スイッチ $\{X_i\}$ を 3 位置的に操作するときは(1)式は任意の内容の和または差の演算が実行できることになる。書込用の電流パルスと励振の一致をとって記憶内容 ω_{ij} の変更を行うが, その変化分 $\Delta\omega_{ij}$ の大きさは書込パルスの時間幅により, また, その方向は書込パルスの極性によって決められる。

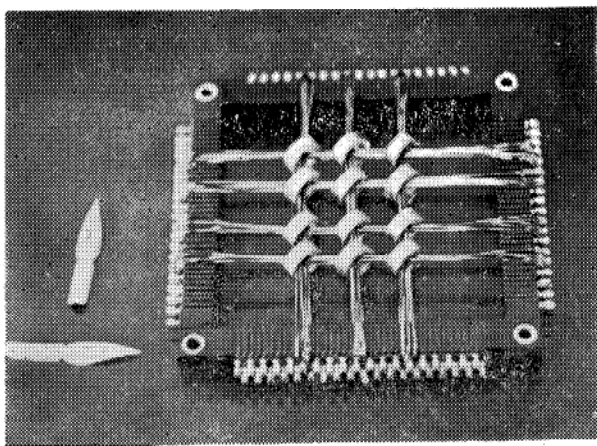


図5 試作マトリクスの外観

図5は筆者が試作した 2×3 の小形マトリクスの試作品を示すものである。

アナログ記憶の特性¹²⁾

アナログ記憶内容と読出電圧 (2 倍周波成分) とは比較的良好な直線性を有していて, これを実験により測定

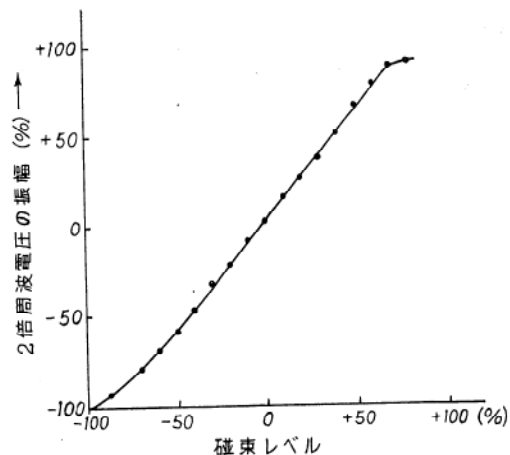


図6 磁束書込パルス幅と2倍周波電圧

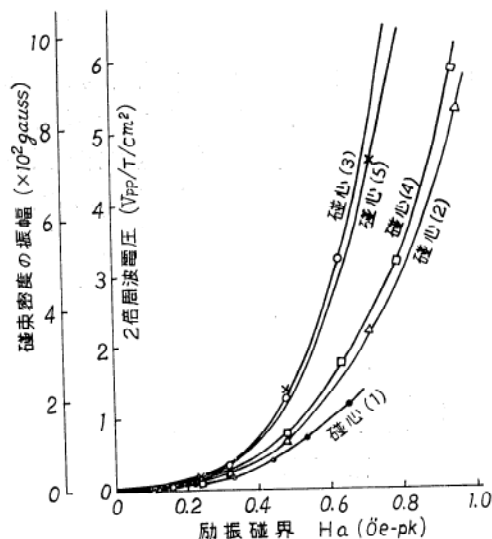


図7 2倍周波電圧と励振磁界の関係

すると図6に示すような直線を得る。また読出電圧の大きさは励振磁界 H_a のほぼ2乗に比例して変化するが (普通4~6ターンの巻線に1記憶要素当り $0.1 \sim 1.0 \text{ Vpp}$ の電圧を得ることができる。図7は励振磁界と2倍周波電圧の関係を実測した結果を示すものであるが, 使用磁心は表1に示すものであり, また, 電圧振幅は単位巻線当りとし, 磁心の断面積は 1 cm^2 に換算して表わしている。図8は励振電流と読出電圧の波形を示すもので, 周波数は励振電流が 100 KC , 読出電圧は 200 KC である。

図9は磁束レベルを変化するのに必要な最低の書込磁界 H_t と励振磁界 H_a の関係を実測したものであり, $H_a=0$ における書込磁界 H_t は磁心の抗磁力となる。励振磁界によって書込磁界は指数関数的に減少し, この特性から電流一致式の磁心選択ができることが理解されるであろう。図10は励振磁界を連続的に加えた状態で書込パルスを断続的に加えると, 出力の読出電圧が階段状

表1 磁心定数表

記号	材料名	板厚 (mm)	高さ (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)	抗磁力 (Oe)
(1)	HIPERLOY-O	0.05	6.5	19	25	0.13
(2)	センドルタ	0.025	3	15	*20	0.145
(3)	"	0.006	3	15	*20	0.22
(4)	"	0.025	3	10	*20	0.13
(5)	"	0.006	3	10	*20	0.22
(6)	センパーマックス	0.025	5	20	25	0.01
(7)	TDK フェライト	/	7	15	20	0.1

但し、*印は巻テープの層数である。

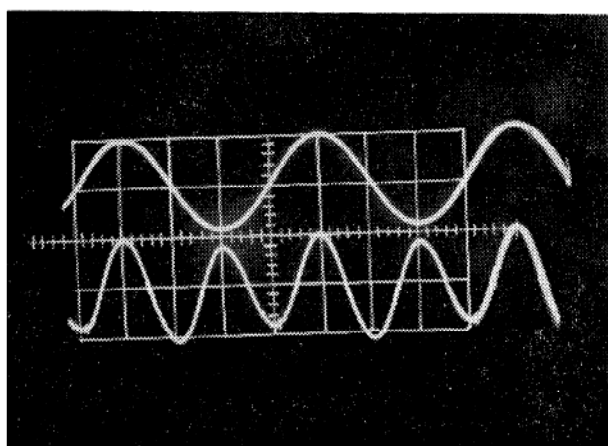


図8 励振電流と読出電圧の波形

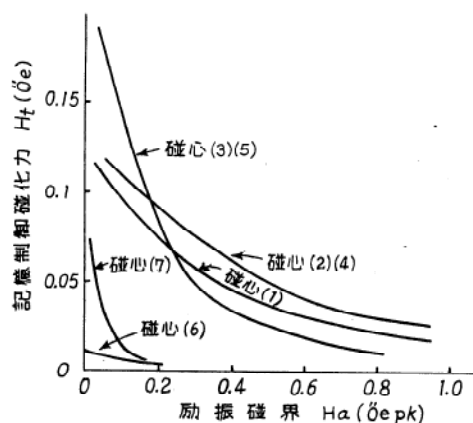


図9 励振磁界による記憶制御磁化力の減少

に変化する様子を測定したもので、書込パルスが加えられない時には読出電圧は一定の値に保持される。また、書込パルスの極性を反転すると、読出電圧は逐次減少する。

アナログ記憶マトリクス動作モード

一般的なアナログ記憶マトリクスではパターン $\{X_i\}$

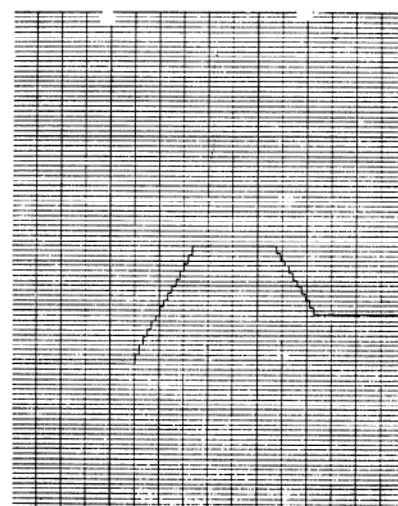


図10 アナログ記憶特性

(マトリクスの行 $\{X_i\}$ の信号)とそのパターンの意味あるいは特徴 y_j (マトリクスの列 Y_j に生ずる信号)とがアナログ記憶要素により結合されていることになる。この結合係数がアナログ記憶量となるわけで一般的には図11のように可変抵抗器で表現すると理解が容易となり、また、現実には先述の Memister などにより構成することもできる。

このようなアナログ記憶マトリクスの動作には2つの異なった面があり、各々、学習動作 (learning)、学識動作 (knowing) と呼ばれている¹³⁾。学習動作はパターン $\{x_i\}$ とその特徴 y_i とが1:1に対応するように結合係数 ω_{ij} が設定される期間であり、この期間は列 Y_j とパターン信号の存在する行 $\{X_j\}$ に電流が繰返し流されて ω_{ij} の値を逐次増大あるいは減少させる。学習期間中のパターンは刺激としてマトリクスに加えられ、マトリ

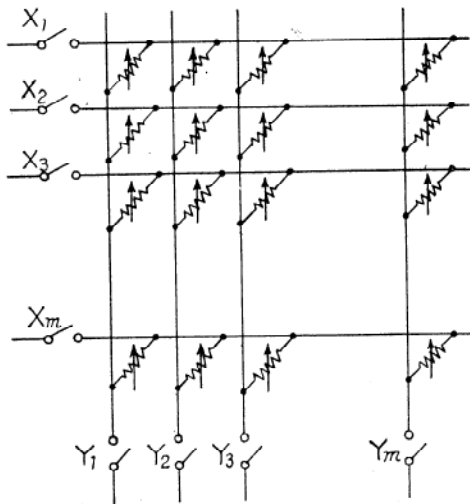


図11 アナログ記憶マトリクスのモデル

クスはこの刺激を経験することにより逐次適応して行くことになる。

学習を終えたマトリクスはパターン信号 $\{x_i\}$ と特徴信号 y_j とを有機的に結合することができて、次のような学識動作を行う。仮りに特定のパターン $\{x_i\}$ が X_i ラインに加えられたとすると学習結果にもとずいてもっとも近い関係にある特徴信号 y_j にもっとも振幅の大きいアナログ信号を発生する。もし Y_j の端子に各ラインに発生する電圧のうち、最大振幅を有するラインを検出する最大値検出回路が接続されているとすると、パターン $\{x_i\}$ はマトリクスによって特徴抽出が行なわれ所定のカテゴリーに分類されることになる。アナログ記憶マトリクスのこの動作を XY モードと呼ぶことにすると、このモードは一種の翻訳あるいはデコーダーとしての動作に類似している。学識動作のもう一つのモードは YX モードであり、ここでは特徴信号 y_j が与えられるとそれに対応するパターン信号 $\{x_i\}$ が発生することになる。このモードはコーディングの作業に類似している。

パターン信号としては ON, OFF のバイナリーパターンであってもよいし、アナログ量のパターンであっても本質的な相違はない。バイナリーパターンによるマトリクスの学習はパターン信号の統計的な回数によって進められるのに対して、アナログパターンではアナログ振幅の時間積を累算した結果にもとずいて結合係数が変化することになる。

条件反射機能

その昔 Pawlow が犬を用いて生体の条件反射の実験を行なったことはよく知られている。アナログ記憶マトリクスも同様な条件反射の機能をもった電気回路系であると解釈できる。

つまり、学習動作とゆうのは繰返して与えられる刺激によって条件付けを行う動作であり、これには比較的長い時間を要する。ところが、条件付けが終了後はパターン信号 $\{X_i\}$ とその意味 y_j とはほとんど瞬間的に対応づけられる。いま、仮りに 32×32 のマトリクスの演算の動作を通常のデジタル計算機で行うとすると、おおよそ、1000点の乗算とその加算を行うことになるからもっとも高速な計算機をもってしても数秒間の演算時間を要するが、アナログ記憶マトリクスでは本質的に並列動作を行うのでおおよそ 1 ms 程度の時間で応答することができる。

アナログ記憶マトリクスのこのような条件反射の機能は実時間で作動する自動制御装置などで興味ある応用が考えられる。

空間回路

学習の終わったマトリクス 2 個を図12のように XY-YX と接続した場合の動作について考えよう¹³⁾。いま、マトリクス A に $\{X_i\}_A$ で表わされるパターンの入力があったとすると、その出力 $(y_i)_A$ はマトリクス B の行 $(y_j)_B$ を刺激することになるからマトリクス B には $\{X_i\}_B$ で

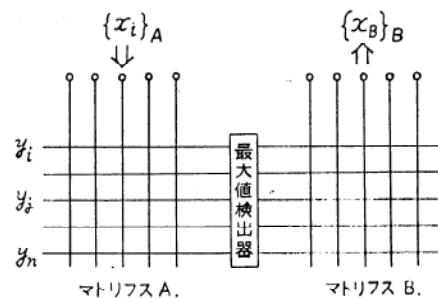


図12 マトリクスの XY-YX 接続

表わされるパターンを出力として発生する。マトリクスの A と B は異なる環境のもとに教育を受けていたとすると、XY-YX 接続されたマトリクスは異なる分野におけるパターン $\{x_i\}_A$ と $\{x_i\}_B$ とを結びつけることができる。即ちこの場合のマトリクスはパターン翻訳機としての動作を行う多次元の空間回路となる。

図13は XY-YX のマトリクス接続であるがその中間に直列信号を並列信号に変換するための通状のシフトレジスタが介在している。この回路ではパターン $\{x_i\}_A$ の組合せがマトリクス B のパターン $\{x_i\}_B$ となるわけであるから出力信号 $(y_i)_B$ はパターン $\{x_i\}_A$ の組合せを識別できるようになる。パターン $\{x_i\}_A$ を文字イロハ…に対応させると、 $(y_j)_B$ は文字の組合せである単語が認識できることになる。この回路では最初のマトリ

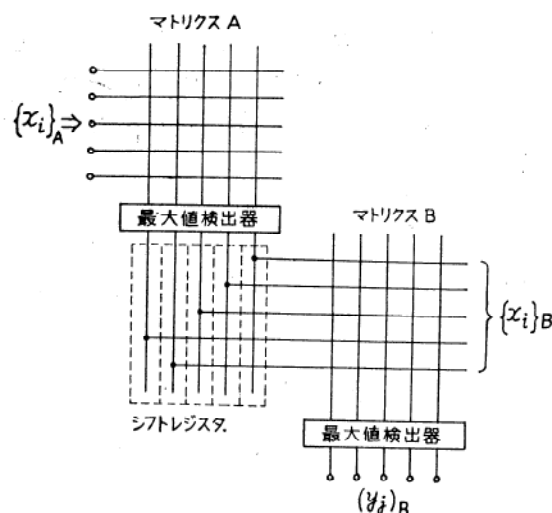


図13 マトリクスの XY-YX 接続

ス A はたまに誤動作をしたとしても、マトリクス B の出力 $(y_j)_B$ などを用いて再教育を自動的に行う機構も考えられるであろう。このようなシステムではマトリクスの自習と云った動作も生じて来る。

アナログ記憶の研究の動機

Nobert weiner はその著書 “Cybernetics” の中で人間は特殊な習性を持つ動物であると同時に風変わりではあるが高級な計算機であることを指摘した。当時は人間の思考のメカニズムがよくわからなかったのでこの原理をエレクトロニクスの分野に持込むことはできなかった。しかし、その後計算機に種々な機能が要求されるようになって、一方ではデジタル計算機の性能を高めるために大型化、高速化への努力が払われるとともに、他方では別の情報処理の方式に目が向けられた。それは、もっとも古くから存在し、しかも、もっとも能率よく動作している計算機——動物や人間の脳の中に秘められた計算機——であり、その機構をエレクトロニクスの分野に導入しようとするものである。

頭脳における計算機——self-organizing data-processing system——の特徴は無数の神経細胞が Semi-random に結合されていることと、これら神経細胞間の情報伝達特性には一定の結合係数がかかっていて、その結合には記憶特性を伴っていることである。

結合係数は一般には荷重 (weight) と呼ばれるものであるが、本質的にはアナログ記憶要素である。このため、Neuron Model あるいは Self-Organizing System といったアダプティヴ回路を実現するには、適当なアナログ記憶要素は必要不可欠なものとなり、最近では米国空軍の要請もあって、活発な研究開発が押進められているようである。

アダプティヴ回路の現況

現在では米国における有数の研究グループが学習機械の実用化にたずさわっていて、その結果、常に新しい機械、素子、それに Software が誕生しつつある。

Ford Motor 社の “MIND” (Magnetic Integrator Neuron Duplication) GE 社の Melpar モデル, Stanford Res. Inst. (SRI) の “Variable gain components” “Memistor” などは人工的な神経細胞の一部であり、これらの素子によって新しいアダプティヴ回路網が構成されている。特に “Variable gain components” は先述の2倍周形の磁心記憶要素であり、SRI ではこの要素を6600個用いて、航空写真などのパターン認識を行なっている。また Rome Air Dev. Center では電気化学素子 “Solion” を360個用いて Child System と呼ばれる学習機械を構成し、入力信号の波形を分類するのに用いている。

自己組織化系

自己組織化系は望ましい出力信号が得られるように、その回路の機能を自動的に修正する能力を持っている。そのため雑音の極めて大きい信号の中から必要な情報を抽出する能力を持っていて、文字や図形の認識やプロセス制御系など一連のパターン信号に帰着させることのできる問題の処理に効果が発揮されるものと期待されている。

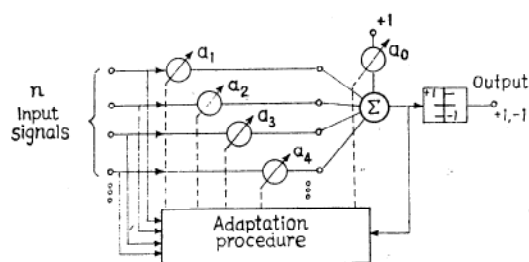


図14 自己組織化系のブロック図

図14は自己組織化系のブロック図を示したものであるが、基本的には生体における神経細胞の動作に類似し、およそ次の3つの基本動作がある。

- (1) 多数の入力は各々荷重された上で加算され、その結果が出力信号に寄与する。
- (2) 出力信号は入力の加算結果がある閾値を越したときに始めて発生し、次段に接続される系の入力となる。
- (3) 荷重の大きさは入力信号または入力信号に関連する制御信号によって変化し、系全体の構成や機能が変化する。

自己組織化系をエレクトロニクスで実現しようとした

代表的な例として Cornell Univ. の Rosenblatt によって試作された “Perceptron” を掲げることができる。

自己回復作用のある回路

システムが動作している期間に部品やその結線に故障が生じたとしても、システムとしては故障による有害な影響を受けないか、あるいは、影響があったとしても短時間で本来の機能が達成されるまでに回復する作用があると、システムの信頼性は非常に高められることになる。実際には回路部品に redundancy を持たせることになるが、幸いにして micro-electronics の技術の発達によって部品の価格や体積が著しく減少する傾向にあるので、回路設計者は部品の数において新しい自由度が与えられることになり redundancy 回路への期待が持てるようになって来た。

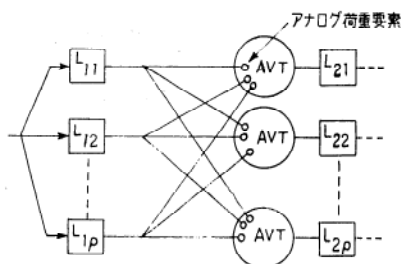


図15 自己回復作用のある回路構成

図15は Adaptive Vote Taker⁶⁾を用いた、一種の自己回復作用のある回路で、図のAVTはアナログ荷重素子と多数決論理素子により構成されている。L₁₁~L_{1p}で表わされるのは通常の論理回路であるが、いま、荷重のすべてが+1であるとする、論理素子 L₁₁~L_{1p}のうち過半数が正しく動作する限り、正しい出力信号が得られることは容易に理解されよう。

自己回復回路では、ある論理素子の出力が誤まっているか、あるいは他の大多數の論理信号と異なった応答を示す場合にはその論理に関する荷重を例えば1%だけ減少する。このような操作が繰返して行なわれる場合は破損したり誤動作する論理は次第にシステムから切はなされて行くことになり、結局、正しく動作する論理素子

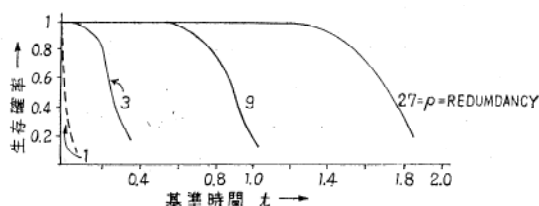


図16 redundancy 回路の寿命比較

だけで出力信号が維持されることになる。図16は1個の論理回路が e^{-6} の規準化された生存確率を有する場合に、100段から成る論理システムを構成し、その redundancy p を 1, 3, 9, 27としたときの回路系全体の生存確率を示す曲線である⁶⁾。

redundancy を持たない通常のシステムでは部品数が増大するにつれて信頼性が低下するがこのように自己回復作用の概念を採用したシステムでは部品個々の信頼度よりもシステムの信頼度の方が高くなることもあり得る

電気回路の自動設計

自己組織化系や自己回復回路の動作でもわかるようにこれらのアダプティブ回路網では回路の機能を望ましい状態に再編成することが可能となる。これを更に拡張して解釈すると、回路またはシステムが同一の過程を経て製造されたとしても後ほどの教育次第で種々な機能をもつ回路または装置に組織換えができるようになる。これらの教育はほとんど自動的に行なえるから電気回路が自動的に設計されると云ってもよいであろう。これらの技術は多数の部品の集合体を作成して一つの機能素子を得ようとする micro-electronics の分野において特に興味深いことである。また、この方面には先述の “Memister” 形式のアナログ記憶が有用な技術となると考えられる。

自動制御への応用

30年もの昔、フィードバック技術が自動制御系に適用されて以来、この技術はプラントの過渡応答や直線性の問題、及び外乱やパラメータの変化などによる問題に対して有力な手段となって来た。しかし、最近の自動制御では多変数システムであることが多く、また制御のための数学モデルが存在しないか、あるいは不明であることもあって、単純なフィードバック技術ではもはや解決されないことがある。

このような制御に対してやはりアダプティブ回路を用いた学習制御が行なわれようとしている。アダプティブ回路による利益として、(1)プロセスから得られるデータの S/N 比が非常に悪いこと、(2)実時間で動作すること、(3)統計的なデータにもとづいて応動すること、(4)完全な数学モデルを与える必要がないこと、(5)自己回復作用によって制御装置の信頼性を高め得ること、(6)プラントの状態変数をパターンとして取扱うことができ、将来のパターンを制御することができる、などを挙げることができる。

この方面の問題は自動制御理論としての発達に著しいものがあつたが、新しい技術として実際面への応用は今後の問題として残されているように思われる。

む す び

以上、アナログ記憶マトリクスを中心にして、その特性、開発状況、アダプティブ回路の構成と機能、などについて述べてきた。

アナログ記憶やアダプティブ回路は未だ解決されない多くの問題を残している。しかし、その目的としている機能は極めて魅力的なものであるだけにこれらの技術に期待する所のものもまた大きいと考えられる。

文 献

- 1) G. Nagy IEEE. Vol. EC-12 No. 4. (1963) p. 388
- 2) 垂井 電気試験所彙報 29巻 1号 p. 45
- 3) Self-Organizing Systems, Inc. カタログ
- 4) 松岡, 三菱電機技報 Vol. 39. No. 9 1965
- 5) B. Widrow West Conv. Record, pt IV pp. 96 (1960)
- 6) J.B. Angell. IEEE. Conv. Record. (1963) p. 193
- 7) W. J. Karplus PROC. FALL JOINT COMP. CONF. 1964 p. 673
- 8) 浦部 桜井 自動制御連合講演会 昭40. 208,
- 9) A. G. Samsenko RCA Review, Dec. 1961 p. 681
- 10) H. S. Craft. electronics (March 22 1963) p. 49
- 11) H. S. Craft Wes. Conv. (1963)
- 12) 阪尾, 大野, 電学誌 (投稿中)
- 13) K. Steinbuch IEEE. Trans. on EC. (Dec. 1963) p. 846