

生体機能をもつ情報処理系の研究 (II)

— 神経細胞モデル IMICTRON の応用 —

Studies of Information Processing Systems having a Living Mechanism.

— Some Applications of Artificial Neuron, IMICTRON —

合 田 周 平 *

Shuhei AIDA

さきに、生体の神経系にみられるパルス系列をもとに新しい情報処理系 **Time Interval Modulation Information Coding System (TIMIC-系)** を定義し、これを実現する素子 **IMICTRON** についての基礎的解析と応用について述べた。今回は、これによる学習系、制御系などの工学的システムへの応用について、その手法ならびに機能など、筆者の考えとそれらの特徴について述べる。

6. フィード・バック制御系への応用

IMICTRON をフィード・バック制御系の調節器として用いることについて述べる。ここでは IMICTRON は 1-入力, 1-出力の調節器 (Controller) として動作し、したがって時間的に変化する不感帯をもった非線形要素とみなすことができ、正および負の出力パルスを必要とすることから、図11のように2コの IMICTRON を組み合わせたブロック線図で示される。またこの系の理論的解析には、図12のようなブロック線図を用い IMICTRON Modulated (IM) フィード・バック制御系とよぶことにした。

制御系において用いられる振幅一定の制御器 (actuator) はリレーまたは on-off 系で行なわれてきたが、近

年比例制御などにパルス幅変調 (PWM, Pluse Width Modulation) が用いられるようになった。PWM においては、パルス間隔は一定であるが、パルス幅が、この系の信号 (通常偏差を用いる) の関数として決定される。これに対し、通常のサンプル値系においては、一定のパルス幅をもって信号により振幅を変調したパルス系列で示された。これに加え、一定振幅という条件をつけると制御の目的のために、パルス間隔を信号により変化させる方式となる。このようなことからパルス周波数変調 (PFM, Pulse Frequency Modulation) が注目されてきた。

フィード・バック制御系における PFM の研究も、実は生体の神経系にみられるパルスによる情報伝達系に端を発しているものといえ、これを拡張した IPFM⁽¹⁴⁾ (Integral Pulse Frequency Modulation) などが開発され、宇宙船ロケットの位置制御などに用いる研究がなされている¹⁵⁾。

ここに述べる IMICTRON による制御系 (IM 系) は、IPFM との類似点は多いが、IM 系においては、パルス間隔は入力信号の 1 次遅れと復元性をもって時間的に変化する閾値と関係して決定される。このことは、通常のサンプル値系とは根本的に異なることでその次元を異にするともいえる。したがって、IM 系は独特の非線形系ということが出来る。

(1) Integral Pulse Frequency Modulated (IPFM) System

IMICTRON による制御系との比較のため、IPFM についての概略を述べる。IPFM はその名の示すとおり積分作用をもったパルス周波数変調方式である。基本的には、入力信号 $x(t)$ の積分値がある特定の値 (閾値) に達するとパルスを発生する系である。すなわち、パルス発生時刻を t_p とすると

$$\theta y = \int_{t_p}^{t_p + \epsilon} x(t) dt \quad (6)$$

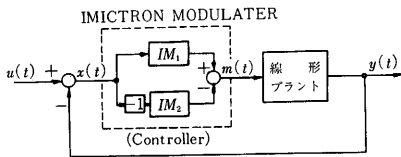
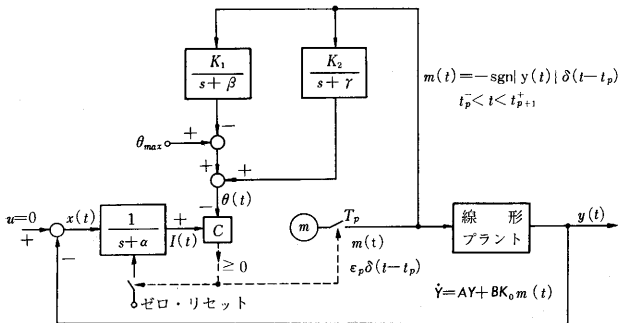


図 11 IMICTRON によるフィード・バック制御系のブロック線図



ϵ_p : p 次パルスの符号 (正または負)
 $\delta(t-t_p)$: インパルス
 Y, A, B : ベクトル

図 12 理論的な解析に用いる IMICTRON Modulated (IM) フィード・バック制御系のブロック線図

* 東京大学生産技術研究所第 2 部

ここで

$$y = \operatorname{sgn} \int_{t_p}^{t_{p+1}} x(t) dt$$

t_p : p 次パルス発生時刻

x : 入力変数

θ : 定数 (閾値)

θ は閾値を表わし、積分器は出力パルス発生時点でゼロ・リセットされる。これらの動作を図 13 に示した。

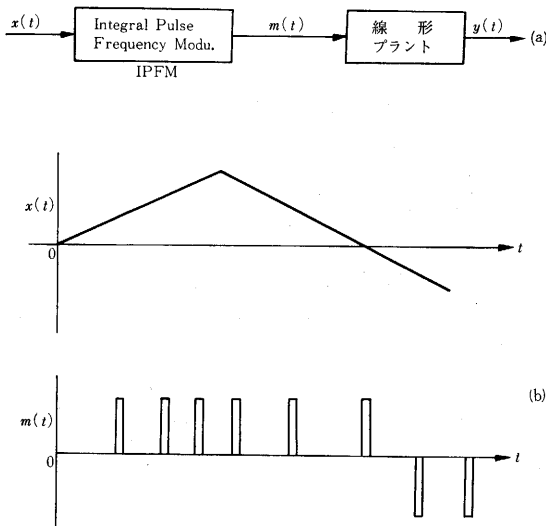


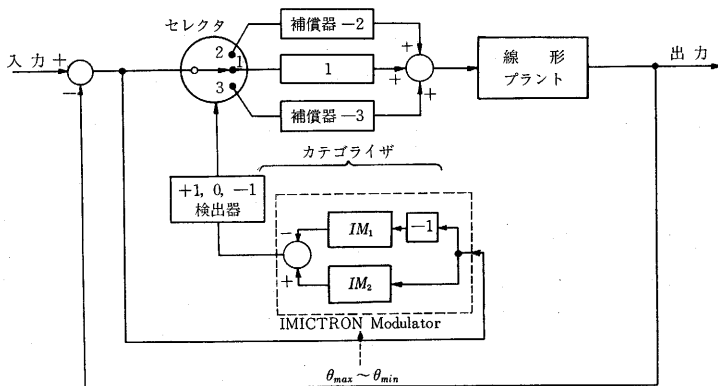
図 13 IPFM 系とその動作例

(2) IMICTRON Modulated Feedback Control System

すでに 3 章で、IMICTRON の特性を述べたが、ここでは入力信号 $x(t)$ にたいし、つぎの(7)式を満足すれば、パルス系列 $m(t)$ をもって、図 12 に示した線形プラント $L(s)$ を制御する IM 系について述べる。すなわち

$$\int_{t_p}^t x(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \geq \theta(t) \quad (7)$$

図 12 において、入力 $u(t)$ を正の時間軸について、ゼロと仮定すると、入-出力関係はつぎの(8)式で示され



1, 2, 3: 補償器の位置
-1, 0, +1: 負パルス, パルスなし, 正パルス (検出器出力パルス)

図 14 IMICTRON による適応制御系の一例

る。

$$K_0 m(t) = \sum_{K=0}^{K=n} a_K Y^K(t), \quad K_0 \geq 0 \quad (8)$$

ここで、 $a_n = 1$

なお、つぎの定義をもうけることにより IM 系を理論的に状態ベクトルを用いて解析することができる。

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ y^{(1)}(t) \\ \vdots \\ y^{(n-1)}(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

これらをもとにした理論的な考察はさておき⁴⁾、まず一般的に IM 系の動作を手ごろな自動車の走行に例をとって解説しよう。

われわれが自動車を運転するとき、白線内の走行に注意を払うのは当然である。もし、自動車が風圧などの外乱により、白線を越えようとする時、ライン・チェンジの意識なき場合は、ゆっくりとハンドルを回し、中央にもどそうとする。このことを、IM 系でいうと、無人走行自動車が、外乱を受けて中央位置を一定値ずれ、最大閾値 θ_{max} (図 3 参照) に達すると (白線にかかる) パルス出力を生じ、自動車をゆっくりと中央位置方向にもどす、と同時に、つぎのある期間閾値が低下する (白線の幅がせまくなる)。このことは一定外乱にたいしては、ハンドルを回すという動作の周期すなわち注意の喚起が早くなることを意味している。また、外乱が中断されると低下した閾値 (せまくなった白線の幅) が次第に増加し、もとの状態にもどる。すなわち適応性をもつ走行といえる。さらにこの特徴を用いて補償器を加え、図 14 の系を考えることができる。すなわち、偏差入力により適応性をもって補償器を切りかえることができる。偏差が増加し IMICTRON Modulator からの出力パルス頻度が増すと、検出器が動作し、セレクタを制御し補償器の位置を決定する。すなわち、初期状態が補償器 -1 で、検出器パルス出力が +1 であると、セレクタは 1 から 2 に移動し、補償器 -2 に切り換える。このような補償器の位置と検出器出力パルス (+1, 0, -1) との関係は、オートマト

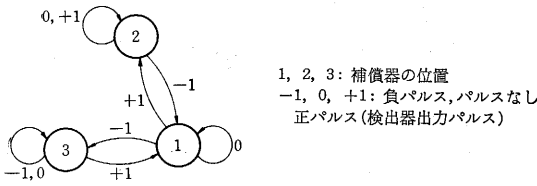


図 15 補償器と検出器出力パルスとの関係を示す状態移行図

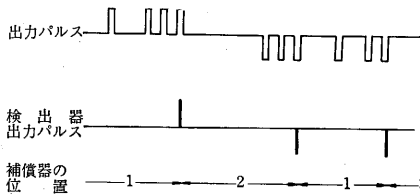


図 16 IMICTRON Modulator の出力パルスと検出器出力パルスとの関係

ンにおける状態移行図で図式的に図 15 として表わすことができる。

図 15 から補償器のつぎの位置は、現在の位置と、図 14 における IMICTRON Modulator のそれまでの出力パルス系列により決定される。動作の一例を図 16 に示した。

(3) 1 次系のプラントをもつ特性

線形プラントに 1 次系 $K_0/(s+\alpha)$ をもつ IM 系について考察しよう。

さきの(9)式のマトリクス A を $-\alpha$ とし、閾値、利得をそれぞれ $\theta_r, K_r(=K_0\mu)$ と一般化すると、線形プラントの出力すなわち IM 系の出力はつぎの(12)式で示される。

$$y(t) = e^{-\alpha(t-t_p)}(y_p^- + K_r \varepsilon_p) \quad (12)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_p = -\text{sgn}(y_p^-) \\ t_p^+ < t < t_p^- + 1 \end{cases}$$

ここで、 ε_p : 出力パルスの符号 (正または負)

y_p^- : 時刻 t_p^- における IM 系の出力

これらのことから、 t_{p+1} 次パルスは、つぎの(13)式を

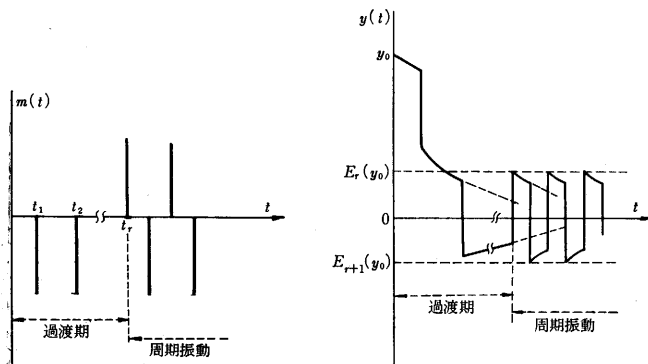


図 17 IMICTRON Modulator の出力パルス系列と 1 次系の線形プラントをもつ IM 系の周期振動。

もとに決定される。

$$\int_{t_p}^t x(\tau - t_p) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau = I(t, t_p) \quad (13)$$

$I(t, t_p)$: $t_p < t < t_{p+1}$ における IMICTRON の内部電位

これらの式をもとに、理論的解析⁴⁾を行なうと、図 17 のような周期振動を得ることができる。これは当然、初期状態 y_0 および 1 次系のパラメータを変えることにより、周期振動とはならず、図 17(b)における、破線の曲線のように、ゼロ点に安定することも起こる。このことは、IMICTRON よりパルスを受けてからの IM 系の出力 $E(y_0)$ が不感帯内に存在した場合として、容易に理解することができる。

さらに、1 次系の線形プラントをもつ IM 系を、一般化した係数 $(-\alpha + \alpha)\theta_r, K_r$ および初期状態 y_0 について表 1 のようにまとめることができる。

表 1 1 次系の線形プラントをもつ IM 系の動作

	IM 系の動作
$y_0 \geq (-\alpha + \alpha)\theta_r$ $E_r(y_0) < (-\alpha + \alpha)\theta_r$	μ 個の負パルスを発生: $y \rightarrow E_r(y), t_p$ 以降はパルスを発生しない。 $t \rightarrow \infty$ とすると $y = 0$ 。系は大局的漸近安定。
$(-\alpha + \alpha)\theta_r > -K_r$ $y_0 \geq (-\alpha + \alpha)\theta_r$ $E_r(y_0) \geq (-\alpha + \alpha)\theta_r$	μ 個の負パルスを発生: $y \rightarrow E_r(y_0)$ または $E_{r+1}(y_0)$ 過渡期 t_r のうち、系は周期振動を起し、その特性は初期状態に依存する。したがって、系は原点において不安定。
$y_0 < (-\alpha + \alpha)\theta_r$	パルス発生しない。 $t \rightarrow \infty$ とすると $y = 0$ 。系は大局的漸近安定。
$y_0 \geq (-\alpha + \alpha)\theta_r$	不安定。

$E_r(y_0)$: r 個の出力パルスによる IM 系の出力

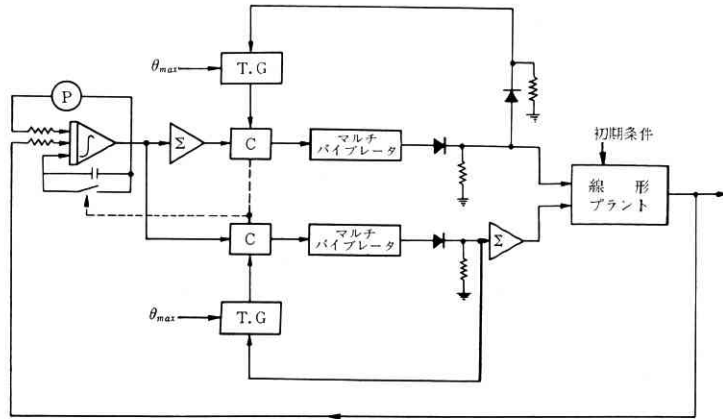
(4) アナログ・コンピュータによるシミュレーション

IMICTRON によるフィード・バック制御系については、さきに状態ベクトルを用いて理論的考察を行なった⁴⁾ので、ここでは、さらに具体的な応用を目的に、アナログ・コンピュータを用いてシミュレーションを行ない、6 章 1 節で述べた IPFM との比較について述べる。

図 18 は、IM 系のアナログ・コンピュータによるシミュレーションのブロック線図である。

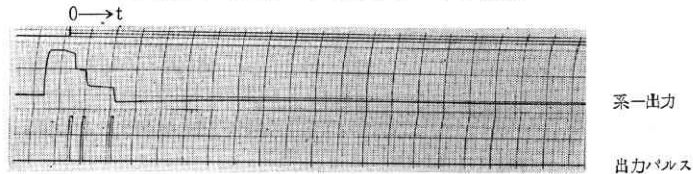
マルチ・バイブレータは使用したアナログ・コンピュータに、遅れ要素がないため、外部から接続したもので、比較器 C の出力インパルスにより一定の幅をもったパルス信号を発生するものである。

すでに理論的にも指適されるように、IM 系は IPFM 系より、周期振動が生じにくいなどの点から、安定性に富むといえる。線形プラントに 1 次形を用いた場合のこれらの関係の一例を図 19 に示した。また、デジタルコンピュータによる同様なシミュレーションも行ない、同じ結果を得た。これらのことから、表 2 のような比較表を得ることができる。

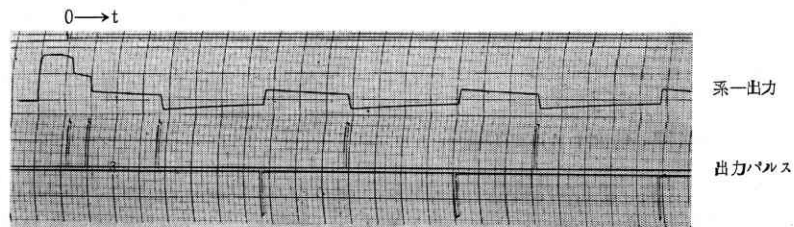


C: 比較器 P: ポテンシオ・メータ TG: 閾値発生回路

図 18 1 次系の線形プラントを IM 系のアナログ・コンピュータによるシミュレーションのブロック線図



(a) IM 系 (漸近安定となる)



(b) IPFM 系 (周期振動を起こす)

図 19 1 次系の線形プラントをもつ IM 系と IPFM 系のアナログ・コンピュータ・シミュレーションによる比較. 同一条件下で, IM 系は周期振動を起こさず漸近安定となる一例を示した.

表 2 IM 系と IPFM 系との比較

	IPFM 系	IM 系
入 力 $x(t)$	連続またはパルス信号	同 左
内部電位 $l(t)$	$\pm \int_{t_p}^t x(t) dt$	$\int_{t_p}^t x(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau$
出力パルス $m(t)$	正 ($y_p < 0$) 負 ($y_p > 0$)	同 左
閾 値	一定値	IMICTRON の特徴とするもので, 時間的に復元性をもって変化する. $\theta_{max} \sim \theta_{min}$
不 感 帯	存在(一定)	存在 (閾値の特性と同様)
安 定 性		IPFM < IM

$y_p = y(t_p)$: 時刻 t_p における系の出力

7. 学習機構への応用

学習とは心理学的にみると, 一定の経験の結果として起こる変容をさすものであり, 学習系は教師のある学習 (外部から教育を受けて進行する学習) と教師のない学習

に分類することができる。

一般にパターン認識系は, 標本 (これが教師) の指示により学習が進行する。たとえば, 図 20 に示す認識機械のモデルにおける出力は, 標本と比較され, その結果にもとづいて認識関数の加重が調節される。すなわち, 外部からの教育によってはじめてこの認識系の学習が進行される。ここで入力 は標本 X_i , 出力は認識結果 Y である。認識されるべき信号 X は補助信号として入力 X_a と同時に投入されるのが特徴である。このようにして学習が終了すると図 20-(b) のように開プールの認識系として動作し入力 X にたいし出力 Y となり特定の希望する入出力関係を保持する。

このことからわかるように, IMICTRON は時間的に復元性をもって変化する閾値の存在により, それ自身学習機能をもつといえる。すなわち, 図 14 は教師のない学習系と考えることができ, これから述べるいくつかの IMICTRON による系は, 教師のある学習系といえることができる。

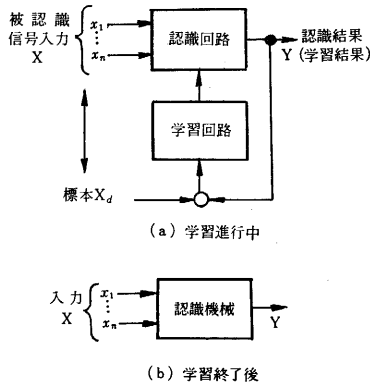


図 20 学習機械のモデル

(1) 最大閾値 θ_{max} を学習的に変化させる

制御対象である線形プラントの特性変化に応じて IMICTRON Modulator の最大閾値 θ_{max} を、教師からのパルス信号により制御しうる系で、図 14 の適応制御系に附加すると図 21 のようになる。

ここで教師は、あらかじめ設定した制御対象の線形

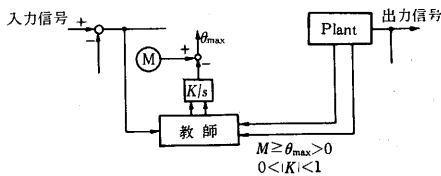


図 21 θ_{max} を学習的に制御する適応制御系

ラントと偏差との関係により、正または負のパルスを発生し積分器をえて一定電位 M との関係により、最大閾値 θ_{max} を制御しうるものである。

(2) 適応論理素子としての IMICTRON

3 章 2 節 図 4 に示した IMICTRON のサンプル値系モデルを拡張して、最小閾値 θ_{min} と閾値制御パルス入力および切換スイッチ SW を附加したもので図 22 のように示される。

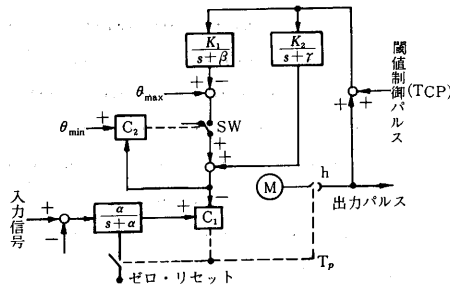


図 22 適応論理素子としての IMICTRON のサンプル値系モデル

i) 閾値制御パルスによる学習

通常の IMICTRON に閾値制御パルス (TCP) 入力のみを附加したもので、標本からのパルス信号をこれに印加すると、パルスの間隔および数 (またはパルス幅) に

より、IMICTRON の閾値を制御しうる。このことは、さきに述べた学習系の加重調節に等しく、しかもパルスの存在によりアナログ的に学習効果が増し (閾値のレベルが低下する)。また閾値制御、出力ともにパルスが存在しなければ、閾値レベルの増加にともない学習上の忘却作用が起こる。これらの学習および忘却期間は β , γ の関係で決定される。

したがって、閾値制御パルス (TCP) のみによる学習系は、IMICTRON それ自体の特性によるもので忘却性をもった学習作用といえ、図 23 (a) のようなブロック線図で示され、あとで述べる IMICTRON 回路網の制御に用い、パターン認識系へ応用することができる。



図 23 学習用 IMICTRON のブロック線図

ii) 最小閾値 θ_{min} を設定する IMICTRON

図 22 に示したように、 θ_{min} をも設定するもので、閾値制御または出力パルスにより閾値が低下し、設定した最小閾値 θ_{min} に到達すると、図 22 における比較器 C_2 の出力により SW が動作し、以後 θ_{min} 側のみに接続され、学習終了系として閾値 $\theta_{min} + K_2 e^{-\gamma t}$ をもって動作するもので、図 23 (b) のブロック線図で示される。

この特徴は、学習終了系つまり IMICTRON が活動的 (active) になるまでの時間を IMICTRON の特性と標本入力により設定しうることや、ノイズに強いことなどがあげられる。

さらに、 θ_{max} と同様に最小閾値 θ_{min} を学習的に制御することも考えられる。すなわち、一度、学習終了系として動作している IMICTRON が (閾値が $\theta_{min} + K_2 e^{-\gamma t}$) 入-出力関係に誤りをきたすと図 24 のブロック線図のように、教師から正または負の出力パルスを生じ、これをもとに θ_{min} の値を修正することにより、希望する入-出力関係に導くことができるものである。

ここで述べた IMICTRON による学習機能をまとめる と表 3 のように分類することができる。

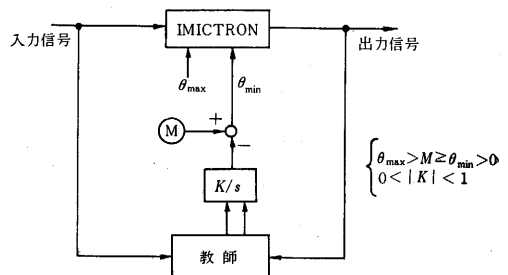
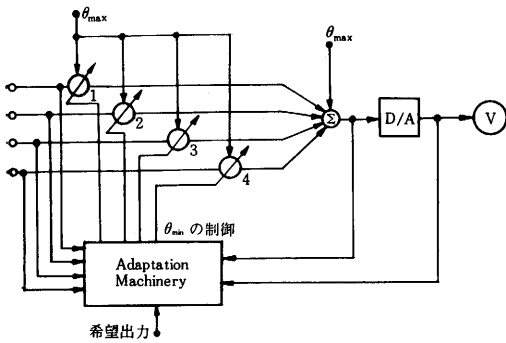


図 24 θ_{min} を学習的に制御する IMICTRON



θ_{max} は学習期間の入力信号により一定とし、 θ_{min} についてはそれぞれ異なる値を設定し、かつ学習終了後もこれを学習的に制御しうる。

図 25 APALINE としての IMICTRON 回路

表 3 IMICTRON の学習機能の分類

θ_{max} 一定	出力パルスにより忘却性をもって学習終了系と閾値制御となる。
θ_{max}	学習的に制御可能
θ_{min}	θ_{min} を設定し、 $\theta(t)$ が θ_{min} に達すると学習終了系となる。さらに θ_{min} を学習的に制御可能。

IMICTRON は ADALINE (Adaptive Linear Neuron) と同様に、Adaptive threshold element として図 25 のように用いることもできる。すなわち、図 25 において、IMICTRON 1, 2, 3, 4 にそれぞれ異なる θ_{min} を設定し、かつ希望する出力と実際の出力との関係により、一度設定した θ_{min} を学習的に制御することができる。このようにして系の出力電圧 (V) により、入力パターンを分類するものである。

このような学習機構は、IMICTRON に限らず、他の素子を用いても実現することが可能といえるが、IMICTRON のもつ閾値変化が、学習期間 (学習が終了するまでの時間) において学習する強さにたいし、ノイズに強い点、また最大閾値 θ_{max} は学習時のみ影響することから、 θ_{max} のレベルを上げ、学習時のみ、特別の入力を用いることなど種々の操作を容易に行なうことができアナログ・コンピュータを用いてシミュレーションを行なった。

また、パルス系列を学習時の入力とすることにより、その期間とパルス間隔にしたがって、設定閾値 θ_{min} に到達させることが可能である。これらの入力とするパルス系列はすでに説明したように、IMICTRON により容易に発生させることができる。

8. 閾値制御パルスによる論理回路

閾値制御パルス (TCP)* の効用についてはすでに述べたように、生理学的な On, Off リスponsを実現するための拡張-IMICTRON などにかくことのできないものである。したがって、さきに述べた生理学的 On, Off

*Threshold Control Pulse

Logic によるパターン認識回路 (I-4 章) なども TCP による論理回路の一端といえるが、ここでは最近、計算回路として提案されている¹⁵⁾空間回路についてフィロソフィーを紹介し、IMICTRON のTCP による論理回路も、このような提案と根本的には相通じるものがあることを述べる。

(1) 空間回路計算機

空間回路計算機の構想は、電気試験所の研究グループにより提案されたもので¹⁶⁾、具体的研究にはまだ時間的な余裕を必要とするが、当面の応用分野はパターン認識偏微分方程式、積分方程式の解法などをあげている。一般的にいうと、空間的、時間的な情報処理装置ともいえるもので、時間と空間をめぐる心理学的、神経生理学的な事実に関連しているものである。

ここでいう時間とは、一般に考えられがちな、いわゆる時計の針による指示をさすものではなく、あくまでも空間的ひろがりをもつ記号としてみるわけで、このことは物理学、工学などでよく使われる時間の記号“ t ”と同様である。

空間回路の基礎的發展を促したのは、光学系の情報理論と神経回路網の解析理論であるといつてよい。したが

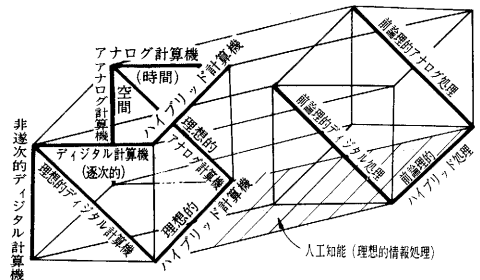


図 26 情報処理技術の関係図¹⁷⁾

ってバイオニクスの研究の一端から、この回路が展開されたといつてもよからう。

図 26 は、種々の情報処理技術を 4 次元立方体の各面で表現したもので、今後の問題点をよく表わしている¹⁷⁾。現在までの情報処理技術は、ほとんどが、アナログ計算機 (時間) とデジタル計算機 (逐次的) とで代表される平面上にあると考えられる。このようなことから考えると、パターン認識などを行なわせるための情報処理装置としては、この平面を下の方向におしすすめる方式の開発が望まれることになる。そこで、最近になって、簡単なアルゴリズムをもつパターン認識に関連して、非逐次的デジタル計算機に相当する技術が Iliac III, Solomon 計算機として開発されている。これは、細胞 (Cell) とよばれる同一の論理回路を平面上にならべた層の上で情報処理が行なわれるものである。空間回路もこの技術に対応するアナログ技術といえるもので図 26 における空間的アナログ計算機に相当するものである。

したがって、空間回路の最終目標は、バイオニクスのそれと同様に、人間とほぼ同一の情報処理能力を有する人工知能の実現にあるといえ、従来の技術を、斜線をほどこした最終目標に向ってすすむことであるといえるわけである。

(2) TCP*-Logic¹⁸⁾

IMICTRON による立体回路は、パターン認識や学習機構を目的に考案したもので、さきに紹介した空間回路の機能の一端をカバーするとも考えられる。

技術的開発は、いまだすすんでいないが、アナログ・コンピュータによるシミュレーションを行ない、今後、素子の改良をまわって実際的に研究をすすめる段階である。

原理的には、IMICTRON を平面上に配列し、ある集団の出力パルスを TCP として他の IMICTRON の集団に印加することにより、それらの IMICTRON を活動的(閾値が低下し、わずかの入力信号で応答しやすくなる状態)にすることである。また、これに生理学的 On, Off Logic (I) 4 章を併用することにより、平面上の図形の動的なパターン認識(図形の変形と軌跡)や、平面の集団を立体的に組み立て、各層、各集団の IMICTRON 出力を他の IMICTRON の TCP とすることにより、空間回路における準能動的パターン認識¹⁹⁾と同様の機能をもたせることも検討している。これらについては、またあらためて発表する予定である。

9. 交通シミュレーション

交通機関、とくに道路における交通信号の周期決定に IMICTRON の機能を応用しようとするものである。つまり、交差点における渋滞の度を閾値に対応させたもので、閾値の復元と渋滞の緩和とを同一において、信号の周期系を考えようとするものである。都電の入り込む交差点では有効なシミュレーションと考えられる。

その他、閾値の時間的変化を有効にとらえ、社会現象のさまざまなモデルを社会工学の立場から研究することも今後に残された大きな課題であり、この方面の開発に役立つものと思う。これらのことも、誌面の都合上、つぎの機会にゆづることとする。

10. おわりに

これまで筆者の提案した TIMIC 系についての理論と

応用の概略を述べてきたことから理解されるように、IMICTRON で実現されるこの系は、生体の機能に学びある程度、非論理的あいまいさをもつ点、いままでのデジタル方式とは次元を異にするものであるといえる。しかし、TIMIC 系の研究の目的は、すでにおわかりのように制御系、学習系などへの応用を中心としたもの、およびパターン認識の分野における情報処理装置などで、これらは現用デジタル計算機の入出力装置、たとえばフィルムの読み込み装置などへの開発も考えられている。また、TIMIC 系が生体機能のシミュレーションにおいて、すぐれた機能を発揮することは、この系により生体オートマトンや、可変的な判断機構をもつ複雑な系のモデル化が可能となるともいえる、なお今後の研究の必要性を痛感する。

したがって、TIMIC 系は、いくつか述べたようなこれによる特有の情報処理技術の開発と、現用のデジタル計算機など大型情報処理装置への入力用情報処理装置としての研究という立場にたつてすすめることにしている。

いずれにしても、生体機能をそなえたこのような系が、今後の情報科学とその技術の発展に、多少なりとも寄与することを願うもので、読者諸氏のご協力とご批判をお願いする次第である。

おわりに、本研究をご理解下さり、ご指導とごべんたつをいただき、東京大学工学部南雲教授、生産技術研究所森助教授および研究実験に協力される大学院学生細川彰君に感謝の意を表する次第である。

(1967年8月8日受理)

文 献

- 14) Blanchard, J.G.: Theory and Application of Pulse Frequency Modulated Systems, Ph. D. dissertation. University of California, Berkeley (1966.1).
- 15) Farrenkopt, R.L. et al: Integral Pulse Frequency On-Off Attitude Control Systems, Tech. Report, Space Tech. Lab. (1963.3).
- 16) 猪股ほか: 空間回路計算機の提案, 電気通信学会, 電子計算機研究会資料 (1965.7).
- 17) 舟久保: 空間回路, 情報の科学-I, 視聴覚情報研究会 (AVIRG)編, 丸善 (1967.5).
- 18) 合田: 閾値制御パルスによる論理回路, 電子通信学会全国大会 No.145 (1967.10).
- 19) 猪股, 空間回路計算機, 電子科学 (1967.7).

*Threshold Control Pulse

