

閾素子ニューロン回路による確率的アナログ 情報処理に関する研究 (第Ⅱ報)

— 加算と減算について —

遠 藤 秀 治

福岡教育大学技術科電気工学教室

(1974年9月10日 受理)

Research of the Stochastic Analog Information Processing by the Neural Circuits using the Threshold Elements (II)

— Addition and Subtraction —

Shuji ENDO

Department of Technology, Fukuoka University of Education

Abstract

The nervous system is considered a huge information processing system, but we have not the minute acknowledges of proper mechanism to neural functions. However there are excellent functions; namely Learning, Memory, Pattern Recognition and etc.. These characteristics contain a lot of problems which are very interesting for the investigators of engineering field and we wish to apply them to engineering field.

In the prior report the author takes notice to the random impulse trains which transmit the information in nervous system and from this phenomenon generates the random P F M pulse train.

Additionally the statistical characteristics of this pulse train was described and the author experimented the stochastic Multiplication with the pulse train.

This report is mainly the stochastic Addition and Subtraction, and these operations correspond to the temporal and the spacial summation in the nervous system.

Now if we watch a neuron in its system, this neuron receives a large number of synaptic inputs from another neurons. And the neuron changes these inputs into a analog potential in the soma and if its inner potential exceeds the threshold, then it sends out a impulse to the axon.

From the phenomenon we note the following; namely the inputs out of the excitatory neurons are considered the algebraic addition and the inputs of the inhibitory neurons are subtraction.

Therefore this report indicates the stochastic Addition and Subtraction with the random P F M pulse trains. In this operation the analog information is equivalent to the mean frequency of random pulse train. The experimental circuits base on the lateral facilitation for Addition and the lateral inhibition for Subtraction, and use three fundamental elements on the model of a neuron.

It's understood that there is a kind of uncertainty between the operational time and its precision in this circuits construction.

Finally this paper is described the application of these analog computation and the correspondences this research to the nervous system.

1. ま え が き

生体神経系は、1つの巨大な情報処理システムと考えることができるが、その特有な情報処理機構についての詳細な説明は不明である。しかしながら、学習作用、記憶、パターン認識等極めて優れた機能について、工学的見地から眺め工学分野に応用して行こうとする場合、非常に興味ある点を持っている。^{1)~3)}

第I報では⁴⁾、生体神経系の中に於ける情報伝達の担い手であるインパルス列に注目し、これをランダムPFMパルス列として取らえその発生と統計的性質について記述した。同時に生体神経細胞(Neuron, ニューロン)の機能をモデル化した3つの基本素子を考え、アナログ演算のひとつである乗算を行なった。しかもその演算がランダムPFMパルス列の平均周波数間の実験である為に確率的なものであることを報告した。

本論文では、以上の延長である確率的アナログ演算の加算と減算について主として述べるものである。このことは神経系の加重作用に対応した演算であると考えられる。即ち、神経系の中の1個のニューロンについて眺めてみると、膨大な数のシナプス入力を他細胞から享受している。これらの入力群は細胞内で時間的、空間的加重され内部電位となり一度アナログ量に変換され閾値との相互関係から閾値を越えるとインパルスとして出力を出す。^{5)~6)} この場合興奮性ニューロンからの入力群は代数的に加算と見なされ、一方抑制ニューロンからの入力群は代数的減算として考えられる。

従って以上の様な神経系の作用に対応し、ランダムPFMパルス列の平均周波数間の加算と減算を試みた訳である。使用した回路は3つの基本素子に基づいたものであり、回路構成は神経系のニューロン結合を模擬したものである。そして加算及び減算ともに、満算時間と演算出力の精度の間には一種の不確定性が存在していることがわかる。

最後に今までの演算の応用と生体神経系の機能との対応について簡単に触れている。

2. 加 算 に つ い て

ランダムに揺らいでいるPFMパルス列の平均周波数間の加算を行なう為には、興奮性結合を持つ閾値1及び2の閾素子を、神経系内に於けるニューロン連鎖の側促進をモデル化した回路構成による。

< 2-1 > 回路と動作原理

回路構成についてはFig.1に示してある。神経系からの側促進に対応し閾素子により組み立てたものを(a)に示してある。そこでこの回路に準じて加算回路を実現する為に(b)に示した様に基本素子; Ni-素子とDi-素子からA-UNITを作り、これを使用し(c)に示す様に n 段接続する。そして一段目; A-UNITの出力を図の様に $f_o(1)$, $f_a(1)$ と表わす。ここで $f_o(1)$ とは、A-UNIT N_1 -素子の出力、 $f_a(1)$ とはDi-素子の出力を示すことにする。またA-UNITの数を加算演算の近似度とする。加算回路構成Fig.1(c)による動作波形はFig.2に表わした形となる。

入力パルス列が図のようになってい場合、A-UNIT1個の出力には、入力パルスの重なり合う部分が誤差となる為に、その重なり合う部分のパルスを適当に遅延し、次段のA-UNITの入力として加えてゆくのである。しかしながらランダムに揺らいでいるパルス列

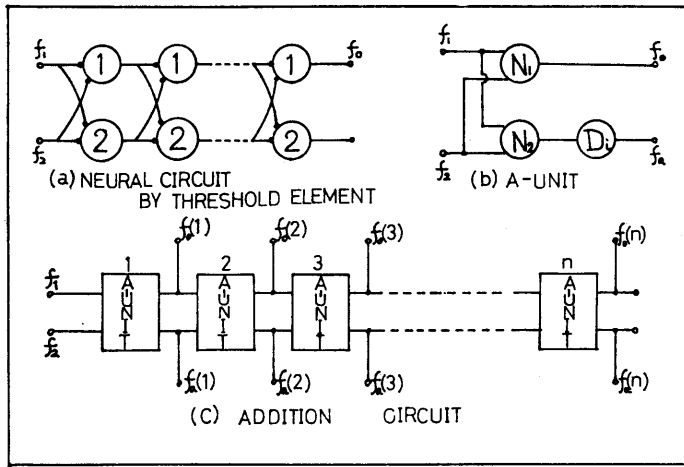


Fig. 1 Construction of Addition Circuit ;
 In the (a) figure —• show the excitatory connection and in the (b) N_1 —, N_2 —and D_i —are fundamental elements. In the (c) $f_o(i)$ and $f_a(i)$ are outputs of the A-UNIT.

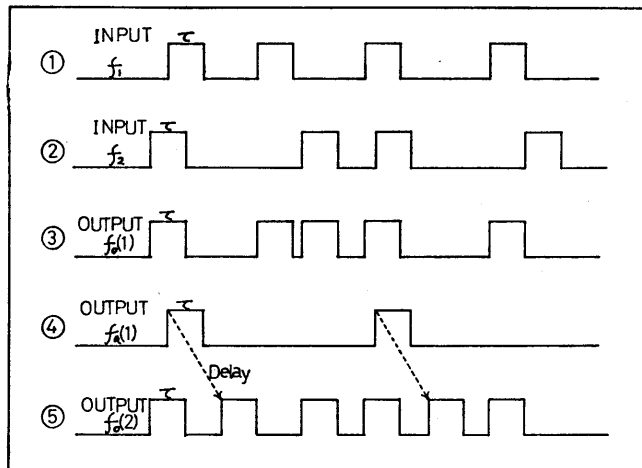


Fig. 2 Action Waves of Addition Circuit ;
 ① and ② are inputs of random P F M pulse trains, ③ and ④ are outputs of one A-UNIT stage. ⑤ is output of second stage of the A-UNIT.
 τ is a pulse width; $50\mu\text{sec}$.

である為に次々と重なり合うパルスは残って来る。そこで加算の精度を上昇させる為には、A-UNIT の数が多く必要である。従って演算時間はそれにつれて増加して来る訳である。この為に演算時間と演算精度の間には、一種の不確定性の関係を持つことになる訳である。

今、加算の第*i*次近似出力 (A-UNIT の数が *i* 番目の出力) を $f_o(i)$ と $f_a(i)$ と表わすと、この値は次式に示す 2 つの帰納的関数で表わされる。

$$f_o(i) = f_o(i-1) + f_a(i-1) - 2\tau f_o(i-1)f_a(i-1) \dots \dots \dots (1)$$

$$f_a(i) = 2\tau f_o(i)f_a(i-1) \dots \dots \dots (2)$$

但し、 τ : パルス幅、 $i \geq 1$ である。

(1) と (2) 式を整理すると、

$$f_o(i) = f_o(0) + f_a(0) - f_a(i) \dots \dots \dots (3)$$

ここで $f_o(0)$ 及び $f_a(0)$ とは、 $f_o(0) = f_1$ 、 $f_a(0) = f_2$ [kHz] のことであり入力周波数を表わすこととする。

以上の回路構成による実験結果について次に述べ、加算演算についての考察を行なう。

< 2-2 > 実験結果

側促進のニューロン連鎖に対応した回路によるランダム PFM パルス列の平均周波数間の加算結果は、Fig. 3 ①～⑤に示した様になる。A-UNIT の数は 3 個まで使用した。グラフ上には計算値(3)式と比較してある。

$i = 1$ (A-UNIT 1 個) の場合、即ち第 1 次近似出力はグラフ ①に見る様に、実験値はほぼ計算値(3)の値と一致している。

$i = 2$ (第 2 次近似出力) の場合が、グラフ ②と③に示してあるが、遅延時間を変えた場合の結果である。

$i = 3$ (第 3 次近似出力) の場合は、グラフ ④と⑤であり、同じく遅延時間の異なる結果について示してある。

この遅延時間については、Di-素子により遅延を施す訳であるが単位パルス遅延： $\tau_D = 40 \mu\text{sec}$ に取り、 D_{32} と D_{96} の各場合について実験を行なったのである。

Fig. 3 の実験結果から考えられることは、まず、A-UNIT 数の増加に従って出力精度は増していることがグラフ ① ② ④を見ると理解される。しかし A-UNIT の増加割合ほどには、出力精度の改善は極めて小さい。また、入力周波数が高くなると計算値(3)式からのズレは大きくなって来る。このことは恐らく周波数が高くなると、当然パルス密度が大きくなりパルス間隔はパルス幅： $\tau \mu\text{sec}$ 以下となる確率が大きくなる。従ってパルス列間の重なり合う部分が多くなり、A-UNIT の増加割合ほどには、改善される割合が飽和状態にあり期待する出力精度はそれほど増加しなくなって来るのではないかと考えられる。

さらに、演算に対してパルス遅延がどの程度の時間の場合に相当であるかは不明である。しかし D_{32} と D_{96} の遅延時間を施した実験結果(グラフ ② と ③ 及び ④ と ⑤) の比較から明らかに D_{96} の方が計算値(3)式に近い実験値を示している。このことは遅延時間が短いと、 $f_a(i)$ のカパルス列のランダム性が失なわれ常に $f_o(i)$ のパルス列と重なり合う現象が生じる為と考えられる。言い換えれば、互いに独立なパルス列の性質が薄らいで相関関係が起きるのではないかと思われる。

なお、全て出力は 10kHz に飽和する。これは使用したパルス列のパルス幅： $\tau = 50 \mu\text{sec}$ である為に入力周波数が 10kHz となるとパルス間隔は $50 \mu\text{sec}$ となり、パルス列は必ず重なり合う為最高出力周波数は 10kHz に飽和してしまうのである。また単位パルス遅延： $\tau_D = 40 \mu\text{sec}$ の値は、飽和周波数のパルス列のパルス間隔が $50 \mu\text{sec}$ となる値から決定したものである。

< 2-3 > 加算の理論的考察

加算の出力は先に記述した帰納的関数(1)及び(2)式にて与えられる。今、この 2 つの式を用いて理論的な考察を進めてみる。

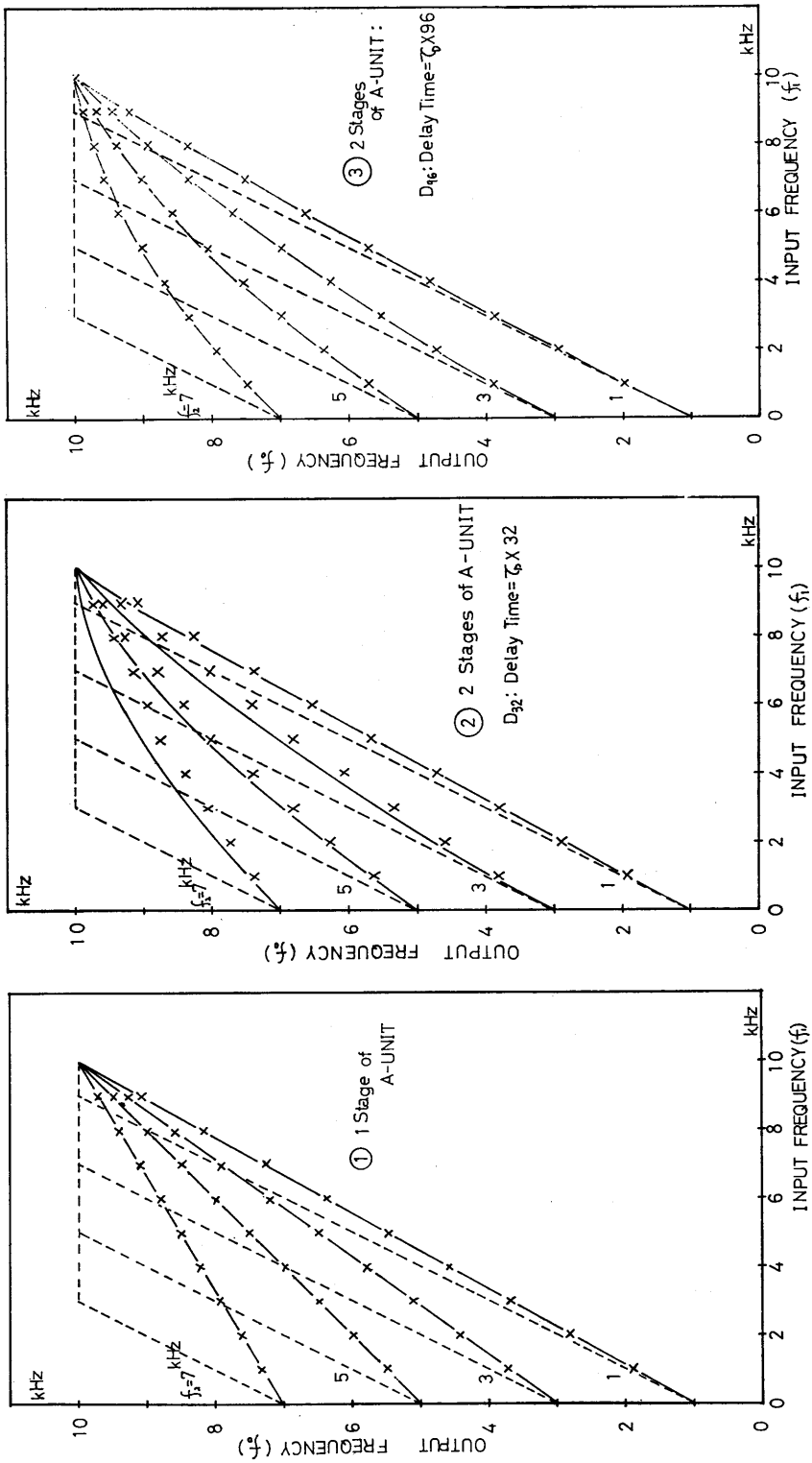
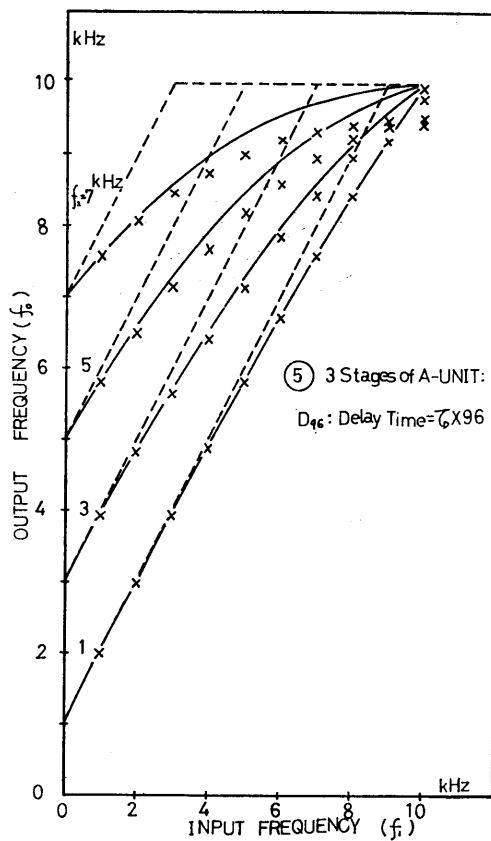
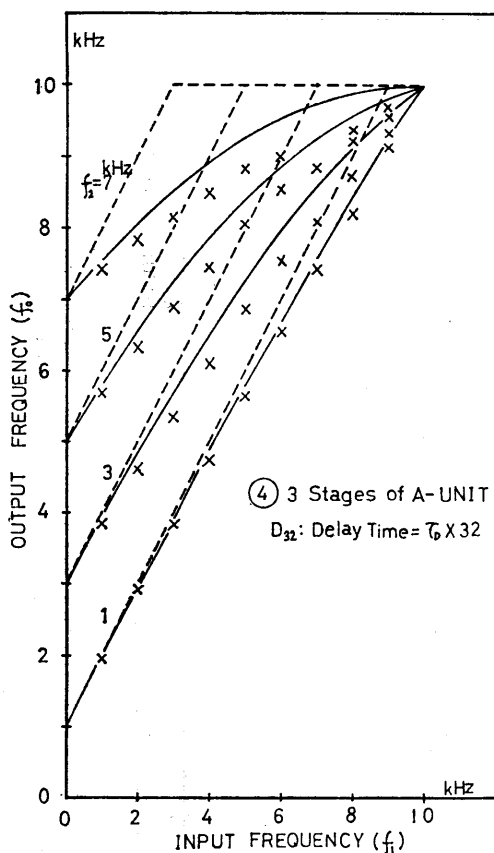


Fig. 3 Characteristics of Addition ;
 In the figure (x) is an empirical value, (—) is the curve of calculative value; equation (3),
 and (---) is the line of final value; ($f_1 + f_2$) kHz. A unit delay time is $\tau_D = 40 \mu\text{sec}$.



(1)式及び(2)式は、離散的な値を持つ関数であるけれども連続関数として取らえると次の様に変形できる。

$f_o(i)$ 及び $f_a(i)$ の微小変化量を Δf_o , Δf_a とすると、

$$\Delta f_o = f_o(i) - f_o(i-1) \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta f_a = f_a(i) - f_a(i-1) \dots\dots\dots(5)$$

と表わされている。そこで式(1)及び(2)を上に入力し整理すると、

$$\begin{aligned} \Delta f_o &= f_a(i-1) - 2\tau f_o(i-1)f_a(i-1) \\ &= f_a(i-1) - f_a(i) = -\Delta f_a \\ \therefore \Delta f_o / \Delta i &= -\Delta f_a / \Delta i \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

同様に、

$$\begin{aligned} \Delta f_a &= 2\tau f_a(i-1)f_o(i-1) - f_a(i-1) = \{2\tau f_o(i-1) - 1\}f_a(i-1) \\ \therefore \Delta f_a / \Delta i &= \{2\tau f_o(i-1) - 1\}f_a(i-1) \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

但し、右辺 $\Delta i = 1$ と考える。

i を連続変数とみなし x に置き変えると次の2つの微分方程式が得られる。

$$df_o/dx = df_a/dx \dots\dots\dots(8)$$

$$df_0/dx = (2\tau f_0 - 1)f_a \dots\dots\dots(9)$$

この微分方程式を初期条件(A)及び(B)の場合について解く。

(A) $x = 0$ の時 $f_0 = f_1, f_a = f_2$

(B) $x = 1$ の時 $f_0 = f_1 + f_2 - 2\tau f_1 f_2, f_a = 2\tau f_1 f_2$

☆初期条件(A)の場合：

(8)式から $f_0 = f_a + C_1$ (C_1 : 定数) $\therefore C_1 = f_1 + f_2$
 $\therefore f_0 = f_1 + f_2 - f_a \dots\dots\dots(10)$

一方(9)式から(8)と(10)式を考慮して解くと、

$$df_a/dx = (2\tau f_0 - 1)f_a = (2\tau f_0 - 1)(f_1 + f_2 - f_0) = -df_0/dx$$

$$\therefore df_0 / \{(f_0 - 1/2\tau)(f_0 - f_1 - f_2)\} = 2\tau dx$$

$$\therefore 1/(1/2\tau - f_1 - f_2) \cdot \log[(f_0 - 1/2\tau)/(f_0 - f_1 - f_2)] = 2\tau x + C_2 \quad (C_2 : \text{定数})$$

初期条件を代入して、

$$C_2 = 1/(1/2\tau - f_1 - f_2) \cdot \log[(f_1 - 1/2\tau)/-f_2]$$

この C_2 を代入し、 f_0 について解くと、

$$f_0 = (f_1 + f_2) - f_2 \{1 - 2\tau(f_1 + f_2)\} / \{(1 - 2\tau f_1) \exp[x(1 - 2\tau f_1 - 2\tau f_2)] - 2\tau f_2\} \dots\dots\dots(11)$$

初期条件(A)の場合について得た解(11)式を見ると、入力周波数 f_1 と f_2 とが入れ変わると出力の値は異なるものとなる。従って今、入力周波数に対する対称性を考察して解くことが必要であるので初期条件(B)の場合を考えた訳である。

☆初期条件(B)の場合：

(8)式より $f_0 = f_1 + f_2 - f_a \dots\dots\dots(12)$

(9)式も(A)の場合と同様に(8)と(12)式を考慮して求めると、

$$1/(1/2\tau - f_1 - f_2) \cdot \log \left[\frac{f_0 - 1/2\tau}{f_0 - f_1 - f_2} \cdot \frac{2\tau f_1 f_2}{1/2\tau + 2\tau f_1 f_2 - f_1 - f_2} \right] = 2\tau(x-1)$$

$$\therefore f_0 = (f_1 + f_2) - \frac{f_1 f_2 (1 - 2\tau f_1 - 2\tau f_2)}{(1/2\tau + 2\tau f_1 f_2 - f_1 - f_2) \exp(X) - 2\tau f_1 f_2} \dots\dots\dots(13)$$

但し、 $X = (x-1)(1 - 2\tau f_1 - 2\tau f_2)$

と表わされ、入力 f_1 と f_2 との対称性は示されていることが解る。

連続量として求めた出力値(11)式と(13)式の比較を行なった結果がFig.4①～⑥までに表わしてある。

なお、入力周波数、出力周波数の値は全てパルス幅： $\tau = 50 \mu\text{sec}$ にて正規化したものである。同時にグラフ上には、ユニットの数と共に補償される値としての補償率： $\xi = [f_0(i) - f_0(i-1)] / (f_1 + f_2)$ を百分率で表わしてある。

入力周波数をパラメータとしてFig.4グラフ①～⑥まで描いた結果から考察されることは初期条件(A)と(B)の比較で明らかに(B)の方が出力精度が良いことである。しかし、(A)の条件による特性(グラフ上では曲線A)もユニット数を増加してみると回路構成上から求め

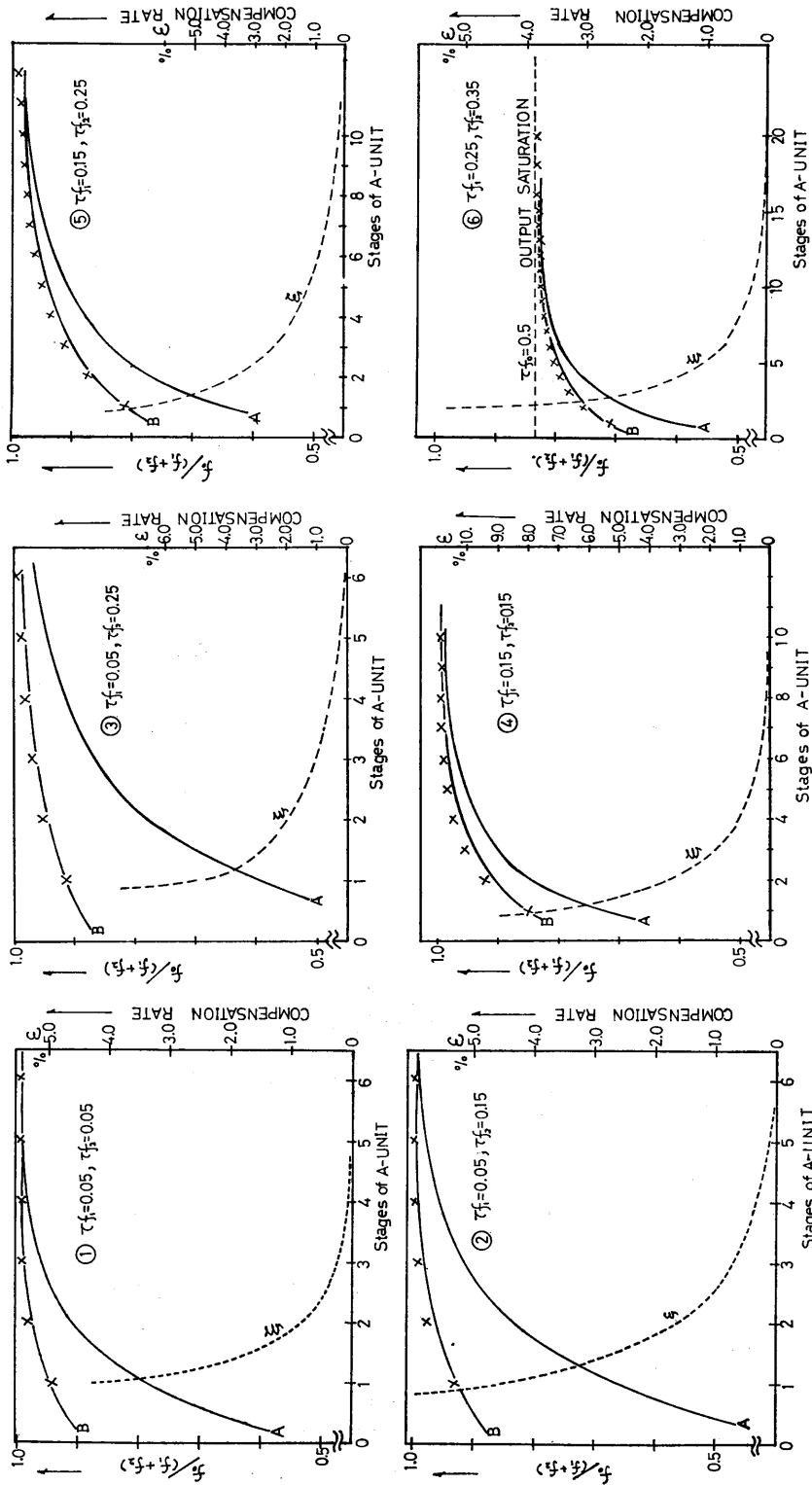


Fig. 4 Characteristics of the theoretical consideration for Addition ;
 Curve A is the result of initial condition (A), curve B is the result of initial condition (B)
 and respectively equations (11), and (13). Dotted curve is the compensation rate of the
 A-UNIT stage; $\xi = [f_0(i) - f_0(i-1)] / (f_1 + f_2)$. And in the figure (x) is a calculative value
 from equation (3). All of the value are normalized by pulse width; $\tau = 50/\text{sec}$.

られる計算値(3)式に接近している事が言える。

加算の実験結果にて結論された様に、この理論的考察による結論も、入力周波数が高くなるに従い、ユニット数を多く取らなければ期待する精度は得られないと言うことができる。これは、入力周波数が高くなると、補償される割合が悪くなって来る為であり、補償率： ξ の曲線からも理解されることである。

なお特に、グラフ⑥では、入力周波数の和が10kHzを越える場合であるので、出力周波数は10kHzにユニット数10あたりで飽和に陥いることが示される。

加算の回路構成から得られる値も、実験の条件を全て理想化した場合、入力周波数が f_1, f_2 kHzであれば、出力には f_1+f_2 kHzと言う値が期待される訳である。もちろんA-UNIT数は非常に大な場合であるのだが。この事は、理論的に求めた連続量の値としての(11)式と(13)式からも示される。

即ち、 $x \rightarrow \infty$ としてみると、

$$\odot \lim_{x \rightarrow \infty} [(11) \text{ 式}] = f_1 + f_2 \dots\dots\dots(14)$$

$$\odot \lim_{x \rightarrow \infty} [(13) \text{ 式}] = f_1 + f_2 \dots\dots\dots(15)$$

と共に理想値としての最終値： f_1+f_2 になることが言える。

従って、生体神経系からの側促進に対応し加算の回路構成を組み立て、この回路より得られる値が、2つの帰納的関数で与えられた。そしてその値は当然離散的なものであるが今これを連続量として考え理論的に解析して考察してみると、実験結果から結論された事柄を説明できることが理解された。従って式(11)ないし(13)の持つ妥当性が裏付けられる。

3. 減算について

生体神経系に於ける抑制性ニューロンからの入力群を受けるニューロンの時間的、空間的加重は一種の代数的減算と見なすことができる。ここでは、そういった現象に対応しランダム PFM パルス列の平均周波数間の減算について述べる。

<3-1> 回路と動作原理

減算を行なう為の回路構成は、Fig.5(a)に見る様に、他の閾素子には抑制性結合をもつ閾素子ニューロン回路を構成する。そして全ての閾素子の閾値は1である。この回路を組み立てる上に、基本素子から同図(b)に示す I-UNIT を作り、(c)の様接続する。

減算回路の動作原理については、Fig. 6 及び Fig. 7 から説明される様に入力パルス列間に重なり合う場合が生じた時、互いにパルスを抑制(消去)する様に回路を組み立てる訳である。Fig. 7 にその動作波形を示したが、入力パルス列に重なり合う部分のパルスを、I-UNIT に於ける D_1 -素子により、ちょうどパルス幅： τ だけ遅延し、抑制期間 $2\tau + \alpha$ の間に入る様にし、そのパルスを消去してやる。そしてランダム性のあるパルス入力である為に、その消去ができなかった場合、適当なだけ遅延し次の I-UNIT の段階で同様に消去を試みることにする訳である。

従ってこの減算を行なう方式も加算と同様に演算時間と精度の間には一種の不確定性が存在していることが言えよう。

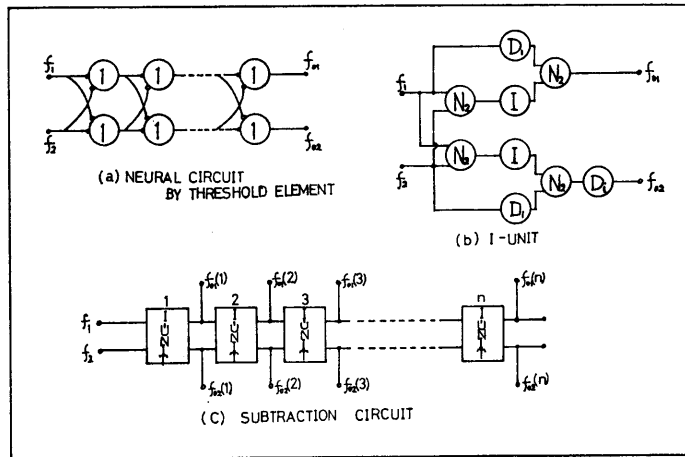


Fig. 5 Construction of Subtraction Circuit ;
 In this (a)—• show the excitatory connection and—○ is the inhibitory and in the (b) N_2 —, D_4 —and I —are fundamental elements; especially D_1 — is special delay time and it's same of the pulse width; $\tau=50\mu\text{sec}$.
 $f_{01}(i)$ and $f_{02}(i)$ are outputs of the I-UNIT in the (c) figure.

なおこの減算回路の出力は、入力周波数 f_1, f_2 kHz の大小に従って、 $f_1 > f_2$ の場合には $f_{01}(i)$ に、 $f_2 > f_1$ の場合には $f_{02}(i)$ 側に出力を持つものとする。また I-UNIT に於ける D_i -素子を、 f_{01} 側あるいは f_{02} 側に入れるかは、実験の結果から試行錯誤的に考えることとする。

減算の回路構成による出力は、加と同様に I-UNIT の数を近似度と考え、 i 個の I-UNIT の出力 (第 i 次近似出力) を $f_{01}(i)$ 及び $f_{02}(i)$ と表わすと次の様になる。

$$\textcircled{\bullet} f_1 > f_2 ; f_{01}(i) = f_{01}(i-1) - 2\tau f_{01}(i-1) f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (16)$$

$$\textcircled{\bullet} f_2 > f_1 ; f_{02}(i) = f_{02}(i-1) - 2\tau f_{01}(i-1) f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (17)$$

但し、 $i \geq 1$ であり $f_{01}(0) = f_1, f_{02}(0) = f_2$ kHz とする。

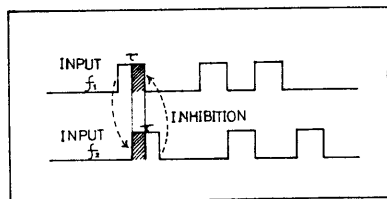


Fig. 6 Explanation of Subtraction Theory

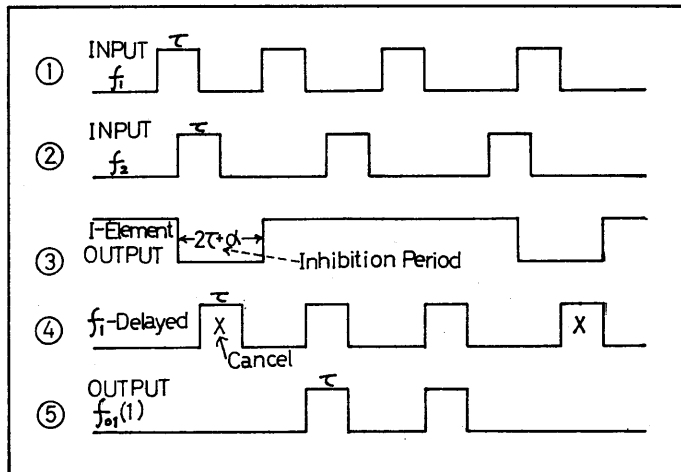


Fig. 7 Action Waves of Subtraction Circuit ;

① and ② are inputs of random PFM pulse trains, ③ is a output of I-Element, ④ is the wave of input f_1 's delayed, and ⑤ is output $f_{01}(1)$.
 τ is pulse width; $50\mu\text{sec}$.

< 3-2 > 実験結果

減算を行なう回路が Fig. 5 にて与えられ、その出力として (16) 式及び (17) 式にて帰納的関数の形に表わされたが、入力パルス幅: $\tau = 50\mu\text{sec}$ のランダム PFM パルス列を用いて実験を行なった結果が Fig. 8 ①~④ までに示したグラフとなる。なお実験は $f_1 > f_2$ の場合のみ行なった。

実験結果については、グラフからも言える様に、計算値 (16) 式と一致することが示される。但し、第 1 次近似出力が $f_1 = 10\text{kHz}$ と $f_1 = 8\text{kHz}$ の場合のみ計算値 (16) 式から少し異なる為に○印にて特に実験結果を示してある。

Di-素子による遅延時間は、単位遅延時間: $\tau_D \times 90$ であり、これより短い場合についても実験を行なったが同様の値を持つことが言える。なお、単位遅延時間 $\tau_D = 40\mu\text{sec}$ である。そして、Di-素子を f_{01} 側あるいは f_{02} 側に入れるかによる出力の影響は明確にその差を確認できなかったことが言える。従ってランダム性がパルス列に保たれていると考えられる。

実験は $f_1 > f_2$ の場合についてのみ行なった訳であるが、 f_{02} 側の出力は常に零である。これは、大なる入力周波数による抑制が常に小なる周波数側に作用していることになるので出力は零となる訳である。

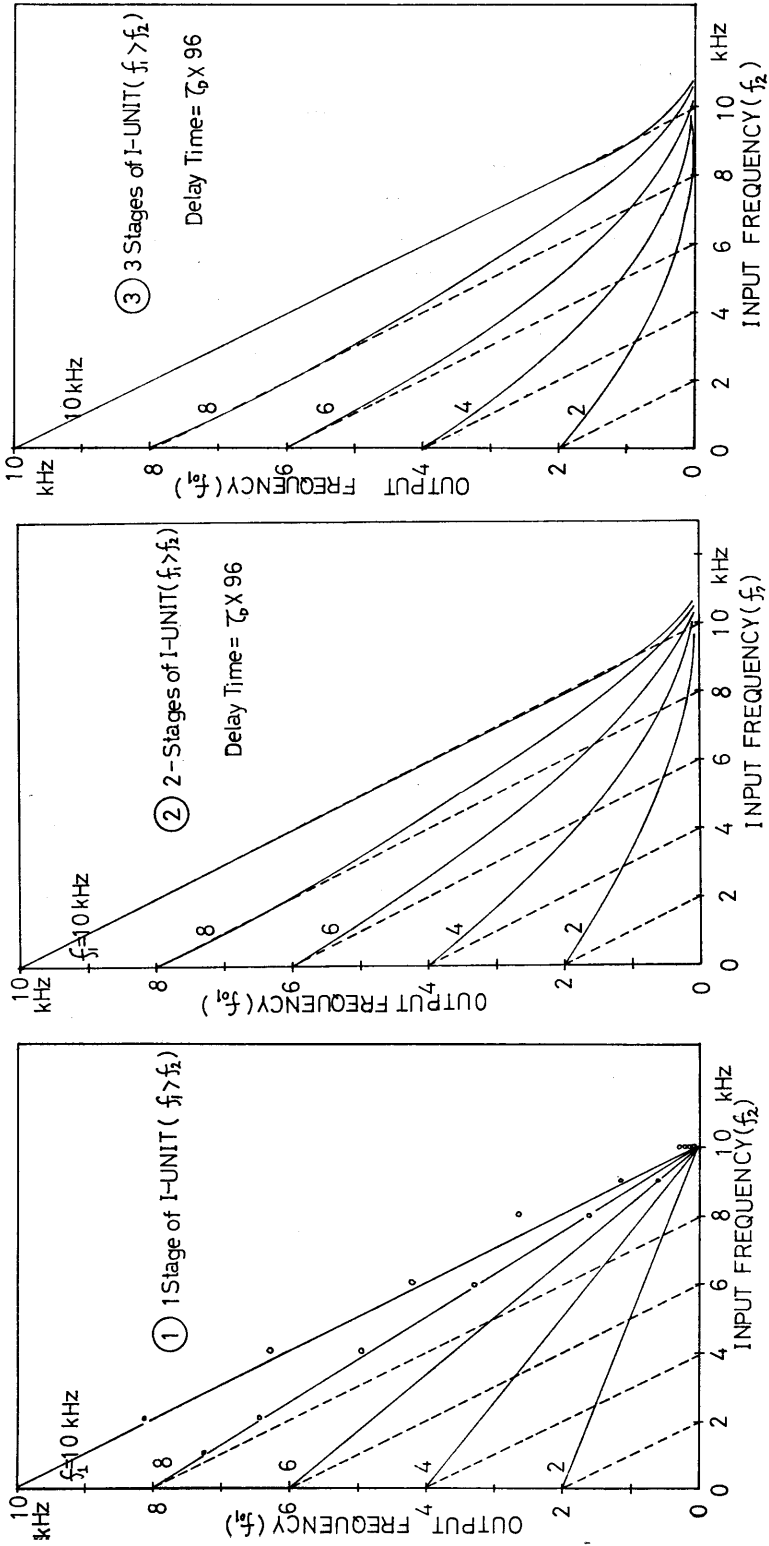
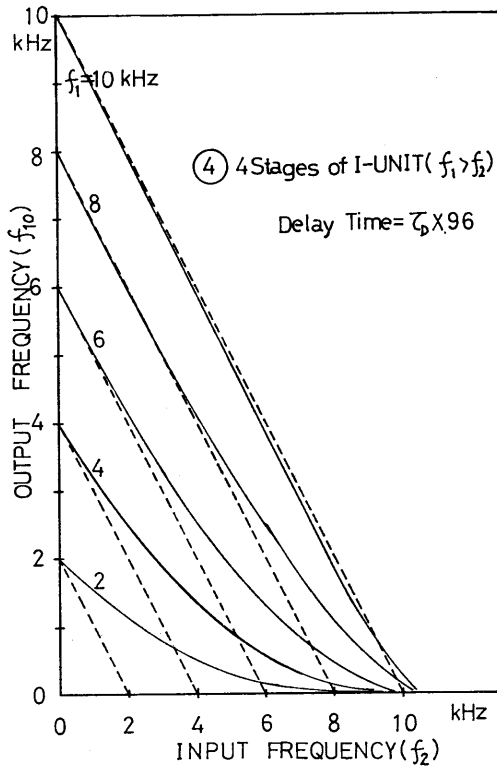


Fig. 8 Characteristics of Subtraction ($f_1 > f_2$);

(—) is curve of calculative value from equation (16), and (---) is line of final value; ($f_1 - f_2$) kHz. All of the empirical value exist on the calculative curve, especially the different empirical value from calculative value indicates circle mark. And a unit delay time, τ_p is 40 μ sec.



< 3-3 > 理論的考察

減算の出力が (16) 式及び (17) 式にて与えられたが、加算の場合と同じ様に連続量としての取扱いを試みてみる。

微小変化量として、

$$(f_1 > f_2) \quad \Delta f_{01} = f_{01}(i) - f_{01}(i-1) \dots \dots \dots (18)$$

$$(f_2 > f_1) \quad \Delta f_{02} = f_{02}(i) - f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (19)$$

を考え、上式に (16) 及び (17) 式を代入し整理すると、

$$\Delta f_{01} = -2\tau f_{01}(i-1)f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (20)$$

$$\Delta f_{02} = -2\tau f_{01}(i-1)f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (21)$$

$$\therefore \Delta f_{01} = \Delta f_{02} \quad \therefore \Delta f_{01} / \Delta i = \Delta f_{02} / \Delta i \dots \dots \dots (22)$$

となる。

また (20) 式から $\Delta i = 1$ と考えると

$$\Delta f_{01} / \Delta i = -2\tau f_{01}(i-1)f_{02}(i-1) \dots \dots \dots (23)$$

ここで Δi を dx と考え連続変数とすると、

$$df_{01} / dx = df_{02} / dx \dots \dots \dots (24)$$

$$df_{01} / dx = -2\tau f_{01} \cdot f_{02} \dots \dots \dots (25)$$

と 2 つの微分方程式が得られる。そしてこの微分方程式を次の 2 つの初期条件の下に解く。

$$(A) \quad x = 0 \text{ の時 } f_{01} = f_1, f_{02} = f_2$$

$$(B) \quad x = 1 \text{ の時 } f_{01} = f_1 - 2\tau f_1 f_2, f_{02} = f_2 - 2\tau f_1 f_2$$

☆ (A)の場合：

$$(24) \text{式から, } f_{01} = f_{02} + C_1 \quad (C_1 : \text{定数})$$

$$\therefore C_1 = f_1 - f_2 \quad \therefore f_{01} = f_1 - f_2 + f_{02} \dots\dots\dots(26)$$

(25)式から,

$$1/(f_1 - f_2) \cdot \log[(f_{01} - f_1 + f_2)/f_{01}] = -2\tau x + C_2 \quad (C_2 : \text{定数})$$

$$\therefore C_2 = 1/(f_1 - f_2) \cdot \log(f_2/f_1)$$

$$\therefore 1/(f_1 - f_2) \cdot \log[f_1(f_{01} - f_1 + f_2)/f_{01}f_2] = -2\tau x$$

上式を f_{01} について解くと,

$$(f_1 > f_2) \quad f_{01} = (f_1 - f_2) + \frac{f_2(f_1 - f_2)\exp[-2\tau x(f_1 - f_2)]}{f_1 - f_2 \exp[-2\tau x(f_1 - f_2)]} \dots\dots\dots(27)$$

$f_2 > f_1$ の場合にも同様にして解けば,

$$f_{02} = (f_2 - f_1) + \frac{f_1(f_2 - f_1)\exp[-2\tau x(f_2 - f_1)]}{f_2 - f_1 \exp[-2\tau x(f_2 - f_1)]} \dots\dots\dots(28)$$

と求められる。

☆ (B)の場合；

(A)の場合と同じように解くと,

$$1/(f_1 - f_2) \cdot \log[(f_{01} - f_1 + f_2)/f_{01}] = 2\tau x + C_3 \quad (C_3 : \text{定数})$$

初期条件を考慮すれば,

$$C_3 = 1/(f_1 - f_2) \cdot (\log[(f_2 - 2\tau f_1 f_2)/(f_1 - 2\tau f_1 f_2)] + 2\tau)$$

$$\therefore (f_1 > f_2) : f_{01} = (f_1 - f_2) + \frac{(f_1 - f_2)(f_2 - 2\tau f_1 f_2)}{(f_1 - 2\tau f_1 f_2)\exp(Y) - (f_2 - 2\tau f_1 f_2)} \dots\dots\dots(29)$$

但し, $Y = 2\tau(x-1)(f_1 - f_2)$ である。

同じく ($f_2 > f_1$) の場合にも,

$$(f_2 > f_1) \quad f_{02} = (f_2 - f_1) + \frac{(f_2 - f_1)(f_1 - 2\tau f_1 f_2)}{(f_2 - 2\tau f_1 f_2)\exp(Z) - (f_1 - 2\tau f_1 f_2)} \dots\dots\dots(30)$$

但し, $Z = 2\tau(x-1)(f_2 - f_1)$ である。

と表わすことができる。

以上の結果について ($f_1 > f_2$) の場合の (29) 式をグラフ化したものが Fig. 9 ①~② である。特性グラフは, 入力周波数の差が大きい場合と小さい場合について示したものであり, 値は全てパルス幅: $\tau = 50 \mu\text{sec}$ にて正規化したものである。そして (27) 及び (29) 式の値は,

$$(16) \text{式の値と共に示してあり, 同時に補償率: } \xi = \frac{f_{01}(i) - f_{01}(i-1)}{f_1 - f_2} \text{ も与えてある。}$$

特性グラフから示される様に, 入力周波数の差が小さい場合の出力は, 入力周波数の差が大きい場合の出力値と同じ精度を得る為には, 多くのユニット数が必要なことが解る。又, パルス密度が高い場合の減算は補償されるパルスの割合も大きくなって来ることが理

解される。

加算の場合と同様、曲線Bの方が計算値(16)式に早く接近していることが示される。しかし曲線Aもユニット数の増加に従い理想値に近付くことがわかる。

さらに減算の場合にも、出力精度を高く望む時には、演算時間を長く取る必要があり両者の間には、一種の不確実性が存在しているであろう事が特性グラフからも理解される。

また減算の出力も、ユニット数を極めて大きく取った場合の最終値は明らかに理想として、 $f_1 > f_2$ の場合、 $f_1 - f_2$ となるが、式の上からも表わせられる。

(27)式あるいは(29)式より、

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [(27) \text{式}] = f_1 - f_2 \quad (f_1 > f_2) \dots\dots\dots (31)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [(29) \text{式}] = f_1 - f_2 \quad (f_1 > f_2) \dots\dots\dots (32)$$

となり理想値としての $(f_1 - f_2)$ になることが示される。

このことは値としては離散的な場合のみ意味がない理論的考察の計算値も、連続関数として取らえ減算の特性を考える上で有効な式であると言える。

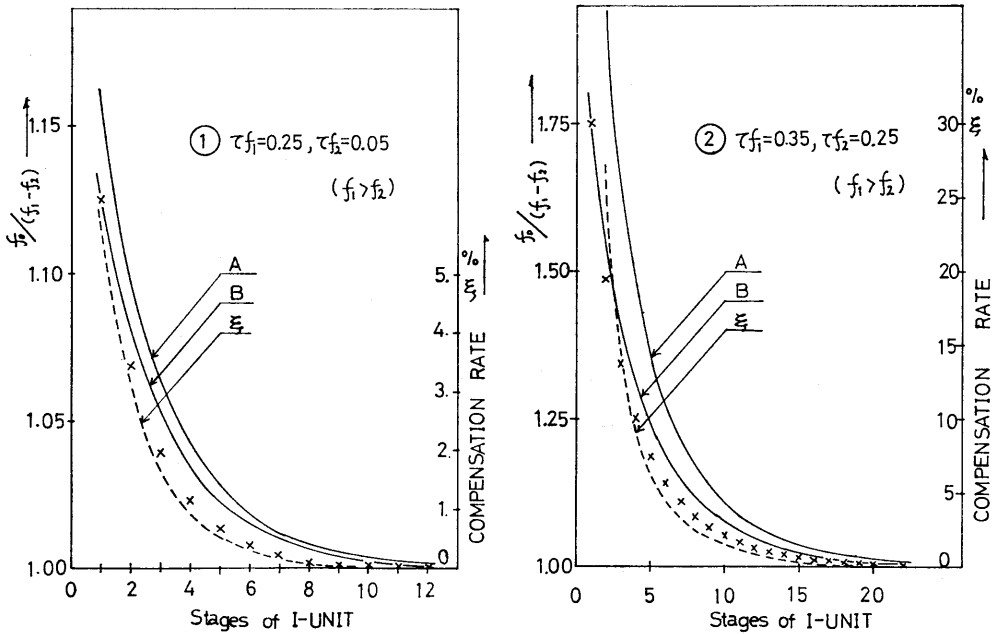


Fig. 9 Characteristics of the theoretical consideration for Subtraction ; Curve A is the result of initial condition (A), curve B's the result of (B), and respectively equations (27) and (29). Dotted curve is the compensation rate of the I-UNIT stage; $\xi = [f_{0,1}(i) - f_{0,1}(i-1)] / (f_1 - f_2)$. In the figure (x) is calculative result from equation (16), and all of the value are normalized by the pulse width; $\tau = 50 \mu \text{ sec}$.

4. 応用と生体神経系の対応について

先回の第I報と今回の報告を通じ、生体神経系の機能に注目し、その優れた特徴をモデ

ル化した基本素子を用いて、確率的なアナログ演算を行なって来た。

ここでは、それらの演算の応用と生体神経系の機能との対応について簡単に触れてみることにする。

<4-1> 演算の応用

(i) 加算の応用：加算の場合の応用については、Fig.10(a)に表わす様に、加算の出力を遅延回路を通し入力に帰還して加えると積分特性を持つ回路が可能となる。

$$\begin{aligned}
 f_i &: \text{入力周波数} & f_i(t) + f_0(t - T_D) &= f_0(t) \\
 f_o &: \text{出力周波数} & \therefore \frac{df_o(t)}{dt} \doteq \frac{f_o(t) - f_o(t - T_D)}{T_D} &= \frac{f_i(t)}{T_D} \\
 T_D &: \text{遅延時間} & \therefore f_o(t) &= \frac{1}{T_D} \int f_i(t) dt \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

従って適当な遅延時間 T_D を考えることにより積分特性をもつ回路が実現できる。

又、Fig.10(b)に示した様に、多入力加算が可能である加算回路があるとすれば、入力の整数倍の出力を持つ倍数演算回路が考えられる。

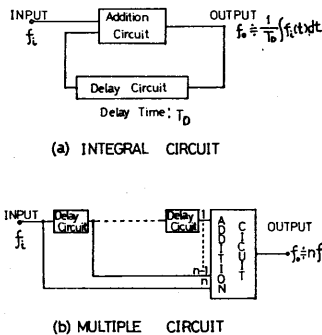


Fig. 10 Application of Addition

(ii) 減算の応用：入力のひとつを適当に遅延し、減算回路の入力とすると、出力には入力の微分特性をもつ回路が得られる。(Fig.11参照)

$$\begin{aligned}
 \text{即ち、} & f_i(t) - f_i(t - T_D) = f_o(t) \\
 \therefore & \frac{df_i(t)}{dt} \doteq \frac{f_i(t) - f_i(t - T_D)}{T_D} = \frac{f_o(t)}{T_D} \\
 \therefore & f_o(t) = T_D \cdot df_i(t) / dt \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

但し、文字の意味は (3) 式と同じである。

以上で閾素子ニューロン回路を用いて確率的な演算を試みた訳であるが、ニューロンからその機能をモデル化した基本素子により回路を構成して来た。そしてこの基本素子がアナログ演算に対して完全系を成しうるかについて考えた場合、容易にその結論は出し得られない。しかしながら、残された演算としての除算について考えてみると、今までの演算を組み合わせインプリシットな形体として与えられることがわかる。

その回路図が Fig.12 に示してあるが複雑な回路構成となるが除算が可能となる。

$$f_1(t) - Af_2(t) \cdot f_0(t) = f_0(t)$$

$$\therefore f_0(t) = f_1(t) / (1 + A \cdot f_2(t)) \doteq 1/A \cdot f_1(t) / f_2(t) \dots\dots\dots (3)$$

但し、文字は全て (3) 式と同じである。

またAは加算回路部の出力から、

$$a'f_2f_0 + a'f_2f_0 + \dots\dots\dots + a'f_2f_0 = a'nf_2f_0 = Af_2f_0$$

$$\therefore A = a'n \quad (a' : \text{定数})$$

であり十分大きな値と考える。

以上の如く回路が複雑になるけれどもアナログ演算に対して最終的には神経細胞の機能をモデル化した基本素子により実行できることが予想できる。

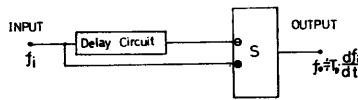


Fig. 11 Application of Subtraction ;
[S] is Subtraction Circuit.

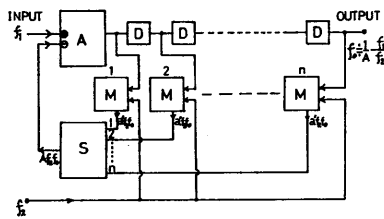


Fig. 12 Division Circuit as the implicit form ;
[A] is Addition Circuit, [S] 's Subtraction Circuit,
[D] 's Delay Circuit and [M] 's Multiplication Circuit.

< 4 - 2 > 生体神経系の機能との対応

本研究に於ける情報の伝送及び処理方法が生体の持つ機能と正確に対応するものではないけれども、およそ以下に述べる点に於いて生体神経系の機能のシミュレーションとして考えることは可能と思われる⁷⁾。

(i) 生体神経系に於ける情報の伝達がインパルス系列であると考えられることから、本研究では、ランダムに揺らいだ PFM パルス列として取らえたこと。

(ii) 閾値作用は、基本素子の閾値に対応させたこと。なおここでは、固定された閾値であり時間的な変動は考慮しなかった。

(iii) ニューロンの空間的、時間的加重の働きは、加算及び減算に見る様に入力パルス列としてランダム PFM パルス列を用いた事から時間的加重は、パルス列のランダム性に持たせた。そして空間的加重で2入力同時入力パルス列の時には一方のパルス列を遅延することにより時間的加重に変換する方式を採用した点に対応できよう。

(iv) さらにニューロンの持つ EPSP と IPSP との代数的加重はそれぞれ加算と減算の演算に対応して考えることができる。

(v) 多入力, 1出力と言う作用は, 本研究にて使用した基本素子, 及びそれから作られるユニットの構成そのものに対応できよう。

(vi) 特に加算の応用としての積分特性の回路は, 中枢神経系の短期間記憶として考えられる反響回路(大脳ではパーペッツ回路)⁹⁾のシミュレーションとして見なされるかもしれない。さらにこのことは, ひとつの自発放電現象として考えられることもできよう。

以上の他シナプス遅延は Di-素子の作用に対応できる。また細かい点がニューロンあるいはニューロン回路の作用と対応できるかもしれない。なお生体神経系の詳細な説明は未だに開発の段階であり今後の神経生理学, 解剖学の研究に期待するものである。

5. む す び

生体神経系が工学的見地から眺めて極めて興味ある機能を持っており特に情報伝送, 処理に関しては優れた特有の機能をもっている。本研究はこれら神経系の機能に注目しランダム PFM パルス列を用い, ニューロンの機能をモデル化した基本素子による回路構成にて確率的アナログ演算を行なって来た訳である。そして特に加算と減算では演算時間と出力精度の間に一種の不確実性が存在していることが示された。

また使用した基本素子がアナログ演算に対して完全系をなすうかは今後の問題と考えられるが, 少なくとも完全系に準ずるであろうことが予想された。

本研究で行なって来た内容が種々の点で生体神経系の機能のシミュレーションであることも確認された。

今後に残された問題点は多く, さらに生体神経系の中に於ける働きに注目する点も多く引き続いて生体系の研究を進めてみたいと思っている。

謝 辞

第Ⅱ報も全て徳島大学工学部電気工学科に於いて行なったものであり,^{9)~13)}終始御助力, 御指導を賜りました牛田富之教授並びに木内陽介講師に深く感謝するしだいであります。

又本報告書を整理するに当り, 御便宜を取り計らって下さいました福岡教育大学技術科主任佐田紀生教授及び稲富和夫助教授に謝辞を表します。そして実験結果のまとめに手伝っていただいた徳島大学工学部電気第4講座の大学院生のみな様にも合わせて感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 樋渡絹二; 生体情報工学, コロナ社 (1971)
- 2) 南雲仁一編; 生体システム, 日刊工業 (1971)
- 3) Ryszard Gawronski; Bionics-The Nervous System as a Control System, ELSEVIER PUBLISHING COMPANY (1971)
- 4) 遠藤; 福岡教育大学紀要, 23 第3分冊 pp.127-146 (1973)
- 5) Ragnar Granit; Receptors and Sensory Perception, YALE UNIVERSITY PRESS (1967)
- 6) Arnold Towe; SENSORY CODING in the mammalian nervous system, MEREDITH CORPORATION (1972)
- 7) 樋渡絹二編; 生体のシミュレーション技術, 講談社 (1973)

- 8) L. ジェラルダン (岩波吉也訳); バイオニクス, 講談社 (19)
- 9) 木内, 遠藤, 牛田; PFMランダムパルス列による確率的加算, 電気学全国大会 (1972. 3. 28)
- 10) 木内, 遠藤, 牛田; PFMランダムパルス列を用いた確率的加算とその応用について, 電気関係学会四国支部連合大会 (1972. 10. 20)
- 11) 木内, 遠藤, 牛田; PFMランダムパルス列を用いた確率的減算, 電気関係学会四国支部連合大会 (1972. 10. 20)
- 12) 遠藤, 木内, 牛田; ランダムパルス入力ニューロン回路のアナログ演算について, 第17回学術講演会・日本自動制御協会主催 (1973. 5. 22)
- 13) 遠藤, 木内, 牛田; ニューロン回路による確率的アナログ演算, 電気四学会九州支部連合大会 (1973. 10. 28)
また神経系全体的な書物として,
- 15) 伊藤正男; ニューロンの生理学, 岩波書店 (1972)
- 16) 日本生物物理学会編; 神経の生物物理, 吉岡書店 (1969)
- 17) バイオメカニズム学会編; バイオメカニズム—ヒトと機械の接点, 東京大学出版会 (1973)
- 18) 勝木保次編; 中枢神経系制御 I, II, III, (情報科学講座), 共立出版 (1968)
- 19) J. S. Griffith [塚原仲晃, 佐藤俊輔訳]; 数理神経生物学, 産業図書 (1973)
- 20) N. Wiener [池原, 室賀他訳]; サイバネライックス—動物と機械における制御と通信, 岩波書店 (1970)
- 21) N. Wiener, J. P. Schade; CYBERNETICS OF THE NERVOUS SYSTEM—Progress in Brain Research vol. 17, ELSEVIER PUBLISHING COMPANY (1965)
- 22) A. B. Brazier; The Electrical Activity of the Nervous System, Pitman Medical Publishing Co. Ltd (1968)
また興味ある研究論文としては,
- 23) S. T. Ribeiro; Random-Pulse Machines, IEEE EC-16, No. 3 (1967)
- 24) H. Nakahama, H. Svzuki 他; A Statistical Analysis of Spontaneous Activity of Central Single Neurons, vol. 3, pp. 745-752, Physiology and Behavior, (1968)
- 25) D. H. Perkel, J. K. Schulman, 他; Pacemaker Neurons—Effect of Regularly Spaced Synaptic Input, vol. 145 pp. 61-63, Science (1964)
- 26) E. Hunt and W. Makous; Some Characteristics of Human Information Processing, vol. 2 pp. 283-335 Advan. Inform. Syst. Science (1969)
- 27) T. A. Mckean, R. E. Poppele 他; The Biologically Relevant Parameter in Nerve Impulse Trains; 6 Bd, Heft 5, pp. 168-170 Kybernetik (1970)
- 28) J. J. Zwislocki; On Intensity Characteristics of Sensory Perceptors—A Generalized Function, vol. 12 pp. 169-183 Kybernetik (1973)