

山梨大学工学部 機械システム工学科

平成 14 年度卒業論文

線虫神経回路網のデータベース化と
その特性解析

指導教官 加藤 初弘 助教授

学籍番号 T97M045K 酒井哲史

平成 15 年 3 月 24 日 卒業

概要

現在、生物の神経回路網（ニューラルネットワーク）は生物学や電子工学の分野でさまざまな研究がなされています。生物学では神経のつながり方やその役割など、電子工学ではニューラルネットの構築などが主な研究内容です。これらの研究が進むにつれて生物学での研究と電子工学での研究を融合させ、生物の神経システムを集積回路における新たな信号処理デバイスの開発に利用していこうという流れが生まれました。このような背景のもとで、本研究では生物の神経システムのデータベースを作成することを目的としています。

本研究では、線虫という微小生物の全神経システムを研究対象としています。線虫の神経のつながりはすでに生物学の研究によって明らかにされており、この結果を用いて線虫ニューロンの結線情報データベースを作成していきます。

データベースとはデジタル化された大量の情報をコンピュータに蓄積しておき、必要なときに必要なデータを取り出すことができるようにデータを管理、保存しておくためのソフトウェアのことです。線虫ニューロンの結線情報のデータベース化には、リレーションシップデータベースによる整理が適しています。データベースのシステムは、データファイル、処理プログラム、特性解析プログラムの3つから構成されています。管理の対象をエンティティ、エンティティの持っている特性をアトリビュート、エンティティ間の関係をリレーションシップといい、データベース化の手法としてまずエンティティ、アトリビュート、リレーションシップが何であるかを定義します。本研究では咽頭部の各ニューロンをエンティティ、各ニューロンの種類と結線方式をアトリビュート、結線情報をリレーションシップと定義しました。次にこれらの情報をデータとして保存、抽出するためにアトリビュート、リレーションシップをコード化し、コード化にもとづいてデータファイルを作成します。次に処理プログラムとしてデータファイルより神経系内部ニューロンテーブル、外部ニューロンテーブル、各ニューロンへの信号の入力割合（重みのマトリクス）の抽出を行うプログラムを作成します。最後に、特性解析プログラムとして、抽出された重みのマトリクスを用いてニューロンが時間発展にともなってどのように発火するかをシミュレーションするプログラムを作成します。

信号伝達シミュレーションを行うために必要な重みのマトリクスの抽出に注目して線虫神経回路網のデータベースを試作しました。神経系内部ニューロンテーブル、神経系外部ニューロンテーブルを抽出することにより内部結線と外部結線の重みのマトリクスを抽出することができ、そのマトリクスを用いて信号伝達のシミュレーションを行えます。また処理場内部結線と外部結線をわけたことでデータの変更、追加が容易に行え、データの拡張にも対応できます。

目 次

0 . 序論	1
1 . ニューロンのモデル化	
1 - 1) ニューロンの構造	3
1 - 2) 情報伝達の仕組み	4
1 - 3) 入力信号の違い	5
1 - 4) ニューロンの結線情報をあらわすマトリクス	7
2 . 線虫の構造	
2 - 1) 線虫の構造	8
2 - 2) 咽頭部のニューロンと筋肉	9
2 - 3) 咽頭部ニューロンの結線	1 2
2 - 4) 線虫ニューロンの結線方式	1 4
3 . 線虫ニューロンのデータベース化	
3 - 1) データベースとは	1 5
3 - 2) データベースの利点	1 6
3 - 3) データベースのシステム	1 6
3 - 4) 概念設計	1 8
3 - 5) データのコード化	1 8
3 - 6) 処理プログラム	2 0
3 - 7) 特性解析プログラム	2 2
4 . 結論と今後の課題	2 7
参考文献	2 8

0 . 序論

近年、集積回路技術は日々進歩しています。現在では集積回路の技術は自動車、家庭電化製品、通信機器など我々の生活を支える様々な機器に組み込まれる形で日常生活に浸透しています。集積回路技術に発展に伴い、機能の高度化や多様化の要請がますます高まってきました[1][2]。

このような流れの中で、生物の神経回路網を集積回路における新たな信号処理デバイスの開発に利用していけないかという試みが生まれました[3]。具体的には生物学の神経回路網の研究結果を用いて電子工学の分野で神経回路網中の信号伝達システムを解析した後、神経回路を模倣した新たなネットワークを構築してそれを集積回路における信号処理に応用していこうというものです。神経回路網中の信号伝達システムの解析を行うというのは、信号が神経回路網の中を時間発展に伴ってどのように流れるかを特定することです。この信号の流れ方を決定するパラメーターとして、「重み」というものがあります。重みとは信号がニューロンに入力される際にかけられる入力割合のことで、重みが大きい値をとっている経路ほど強く結合している、つまり信号が流れやすいといえます。生物の神経システムを理解するためには、まず神経回路網上の各信号伝達経路の重みの解析を考える必要があります。しかし生物の神経回路網は非常に複雑であり解析が困難なため、解明されているのはごく一部の生物だけです[4]。さらに、神経回路網中の信号の流れ方を特定するにはよおり多くの研究が必要とされています。その中で、線虫という虫は比較的構造が単純であり細胞数も少ないために、すでに神経のつながりが解明されています[5]。本研究では、その研究結果を用いて線虫神経回路網をデータベース化し、データベースより抽出した重みを用いて特性解析を行っていきます。

データベースとは、デジタル化された情報をコンピュータに蓄積しておき必要なときに必要な情報を取り出すことができるようにデータを保存、管理しておくソフトウェアのことです。線虫ニューロンの結線情報はリレーショナルデータベースによる整理がむいており、この方法を適用してデータベース化を行っていきます。リレーショナルデータベースにおいて管理の対象のデータをエンティティ、エンティティが持っている特性をアトリビュート、エンティティ間の関係をリレーションシップといいます。データベースのシステムは、データファイル、処理プログラム、特性解析プログラムの3つで構成されています。データベース化の手法としてまずエンティティ、アトリビュート、リレーションシップの定義づけを行います。次に各概念をコード化し、コード化にもとづいてデータファイルを作成します。データファイルでデータの保存、管理が行われます。次に処理プログラムを作成します。処理プログラムは、データファイルより結線情報を読み取って神経系内部ニューロンテーブルと外部ニューロンテーブルの抽出を行います。また2つのテーブルを抽出した後、各内部ニューロン、各外部ニューロンの結線方式をよみとり、これを重みに変換します。次に特性解析プログラムを作成します。特性解析プログラムは、処理プログラムで出力された重みを用いてニューロンが時間発展に伴ってどのように発火していくかをシミュレーションし、それをダイアグラムで表示します。

本研究では、信号伝達シミュレーションを行うために必要な重みのマトリクスの抽出に注目してデータベースを作成していきます。また、データの更新や追加、データの拡張にも対応できるように内部結線と外部結線のそれぞれの重みを別々に抽出できるようにします。

1 . ニューロンのモデル化

1 - 1) ニューロンの構造

ニューロンとは、情報伝達を行うための細胞のことである。ニューロンは細胞体 (cell body) 、軸索 (axon) 、樹状突起 (dendrite) によって構成されている。ニューロン同士はシナプスと呼ばれる構造で互いに連絡しており、ニューロンに流れる情報は軸索を経てシナプスを介し、隣のニューロンの樹状突起にへ伝わっていく。(図 1 - 1)

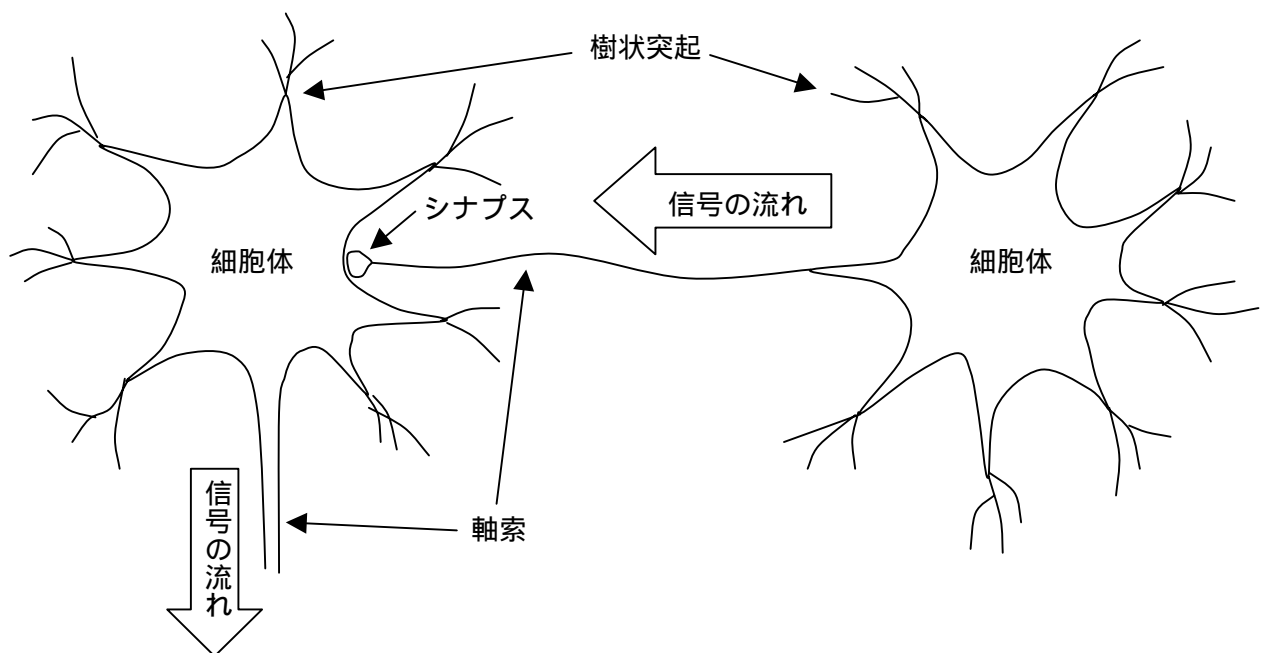


図 1 - 1 : 信号伝達の流れ

1 - 2) 情報伝達の仕組み

あるニューロンの樹状突起に他のニューロンの軸索から入力信号が伝わってくると、ニューロン内の電位（膜電位）が変化する。この膜電位が閾値を超えるとニューロンはパルスを放出する。閾値とはある値の膜電位のこと、実際の値は約 -40 mV である[6]。膜電位が閾値 -40 mV を越え、パルスを放出することを「発火」といい、そのパルスが出力信号となって軸索を伝わっていく。パルスが他のニューロンとの結合点のシナプスに達すると、軸索の末端から情報伝達物質が放出される。この情報伝達物質の作用によって、受け手のニューロンは膜電位を変化させる。このようにして情報は伝達されていく。（図 1 - 2）

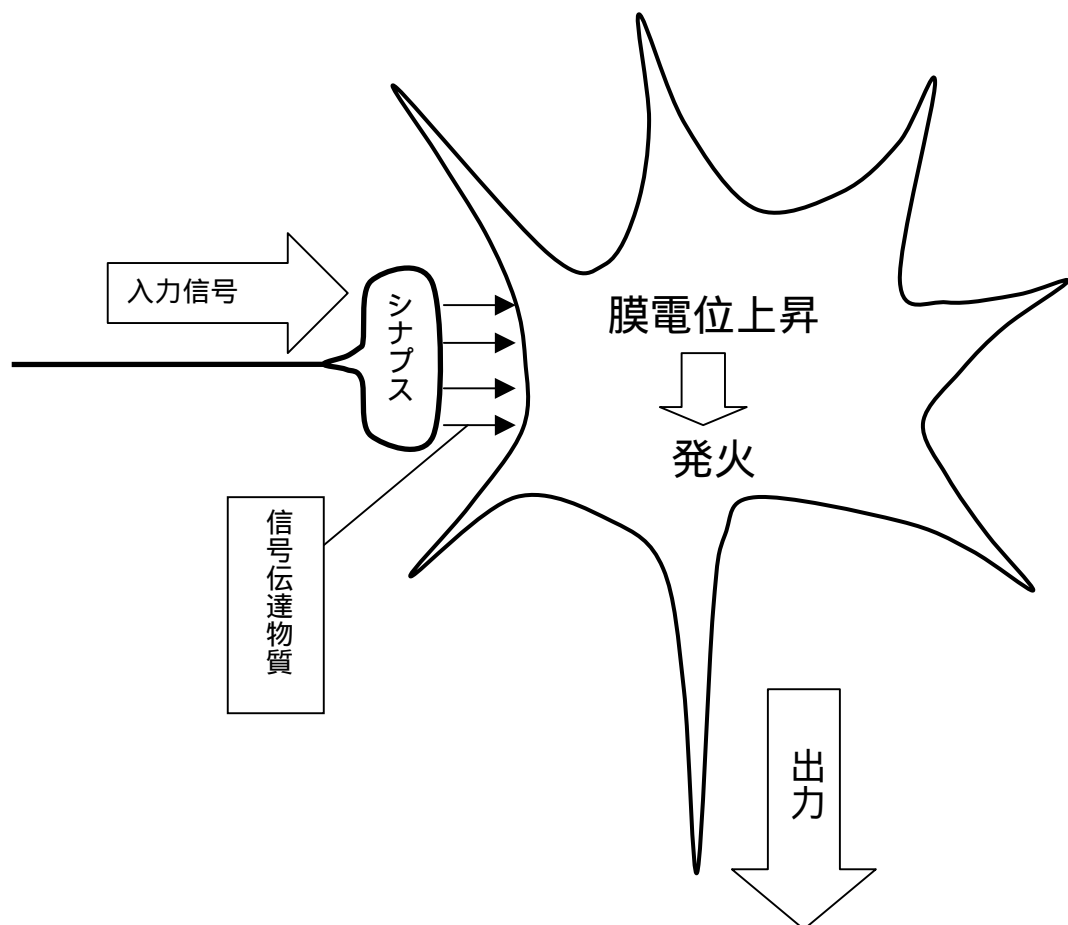


図 1 - 2 : 情報伝達の仕組み

1 - 3) 入力信号の違い

1つのニューロンは複数のニューロンに結合されており、そしてその結合のされかたによって入力信号の作用が異なっている。強く結合しているニューロン間では入力信号は強く伝わるだろうし、弱い結合では入力信号は弱いはずである。そこでニューロンに信号が入力される際に「重み」というものを考える必要がある。重みとは、結合の強さをあらわす値のことである。重みが大きいほどニューロンの膜電位を大きく上昇させる作用があることをあらわしている。ここで2つのニューロンから入力信号をうけるニューロンを例にとってみる。それぞれの入力を x_1 、 x_2 、重みを w_1 、 w_2 とする。 x_1 と w_1 を掛け合わせたものと x_2 と w_2 を掛け合わせたものが、入力受け手ニューロンにおける各シナプス結合部の電位の変化をあらわし、それに伴うに入力受け手ニューロンの膜電位の上昇を「 A 」としてモデル化すると次式がえられる。

$$A = x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2$$

上記の説明をふまえて、 n 個の入力と1つの出力をもち、 A が閾値より大きければ1、閾値以下なら0を出力するニューロンの数式モデル化を試みる。それぞれの入力を x_1 、 x_2 、 x_3 、.....、 x_n 、それぞれの入力に対する重みを w_1 、 w_2 、 w_3 、.....、 w_n とし、 θ を閾値とすると、このニューロンの膜電位上昇 A は

$$A = \sum_{i=1}^n (x_i * w_i)$$

となる。これより、出力信号 Y は

$$Y = f(A) \\ = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

であらわされる。関数 $f(x)$ をニューロン関数と呼ぶことにし、数式モデル化したニューロンのイメージ図を図 1 - 3 に、ニューロン関数のグラフを図 1 - 4 にしめす。

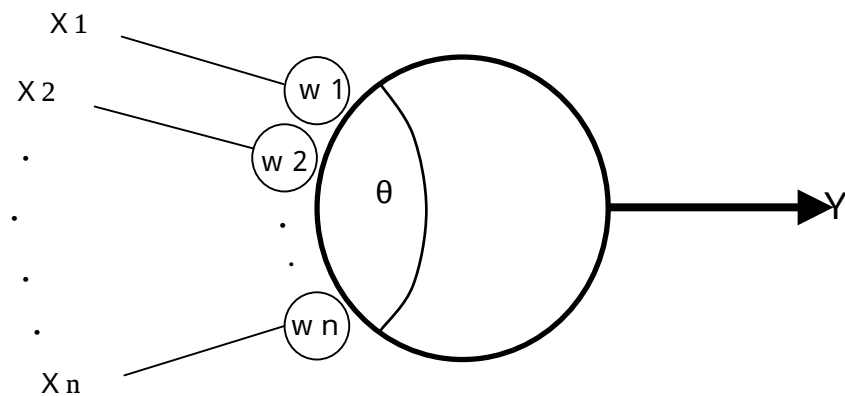


図 1 - 3 : モデル化されたニューロン

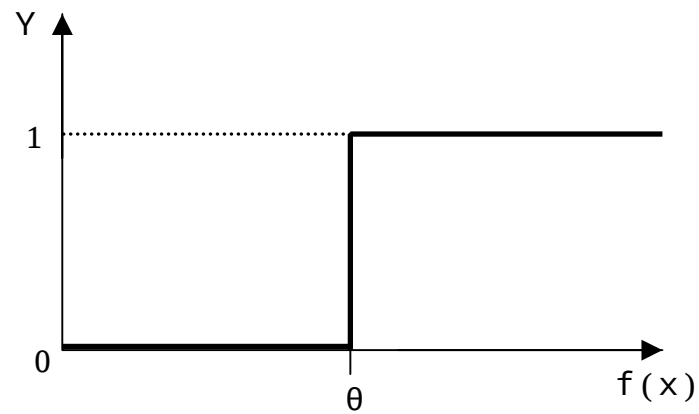


図 1 - 4 : ニューロン関数

以上のような方法でニューロンをモデル化し、モデル化したニューロンを組み合わせしていくことによって神経回路網を構築していく。

1 - 4) ニューロンの状態と結線をあらわすマトリクス

ニューロン同士は複雑に結合しあっている。ここでは、ニューロンの結線をマトリクスで表せることを説明する。

n個のニューロンが複雑に結合しあっている一つの系を考えてみる。まず各ニューロンに任意の番号をつける。そして、各ニューロンからの出力を N_1 、 N_2 、 N_3 、.....、 N_n とする。また j 番のニューロンから i 番目のニューロンへの入力にかかる重みを w_{ij} とする。 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、....、 Y_n を各ニューロンへの入力とすれば、次式がえられる。

$$\begin{aligned} Y_1 &= N_1 \cdot w_{11} + N_2 \cdot w_{12} + \cdots + N_n \cdot w_{1n} \\ Y_2 &= N_1 \cdot w_{21} + N_2 \cdot w_{22} + \cdots + N_n \cdot w_{2n} \\ Y_3 &= N_1 \cdot w_{31} + N_2 \cdot w_{32} + \cdots + N_n \cdot w_{3n} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ Y_n &= N_1 \cdot w_{n1} + N_2 \cdot w_{n2} + \cdots + N_n \cdot w_{nn} \end{aligned}$$

上式をマトリクスになおせば、

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \cdots & w_{2n} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & \cdots & w_{3n} \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix}$$

となる。上式かわかるように、重さのマトリクスをもちいてニューロンの結線をあらわすことができる。

2．線虫の構造

2 - 1) 線虫の構造

線虫 (C-elegance) とは、959 個の細胞と 302 個のニューロンを持つ直径約 1 mm の微小生物である。線虫のニューロン同士の結合や、筋肉との結合は DONNA G. ALBERTSON、J.T. THOMSON によってすでに明らかにされており、その研究結果を用いてデータベース化を行う。線虫の図を図 2 - 1 [7] にしめす。



図 2 - 1 : 線虫

線虫には、咽頭、輸卵管、卵巣、子宮、腸、陰門、直腸、肛門などの器官がそなわっている。本研究では、まず線虫咽頭部の神経回路網をとりあげて議論をすすめていく。線虫咽頭部の細胞数は 57 個、ニューロン数は 21 個である。咽頭部拡大図を図 2 - 2 にしめす。

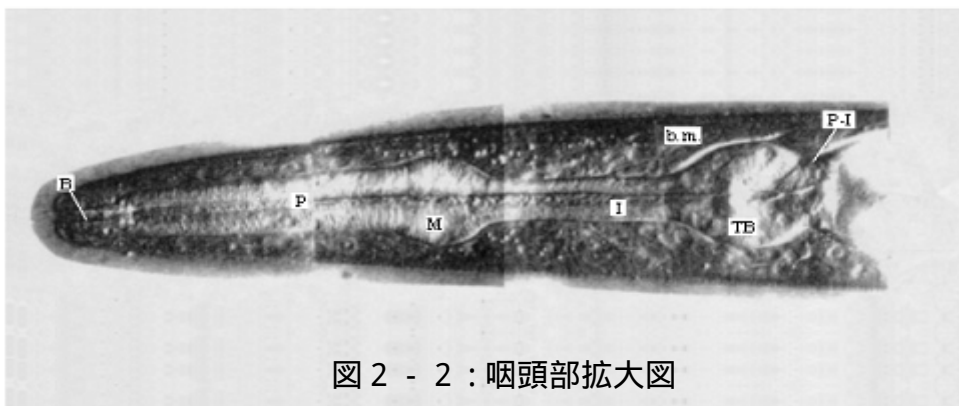


図 2 - 2 : 咽頭部拡大図

2 - 2) 咽頭部のニューロンと筋肉

線虫咽頭部には運動ニューロン、介在ニューロン、その他のニューロンの3種類のニューロンと、m 1、m 2、m 3、m 4、m 5、m 6、m 7と呼ばれる7つの筋肉が存在している。

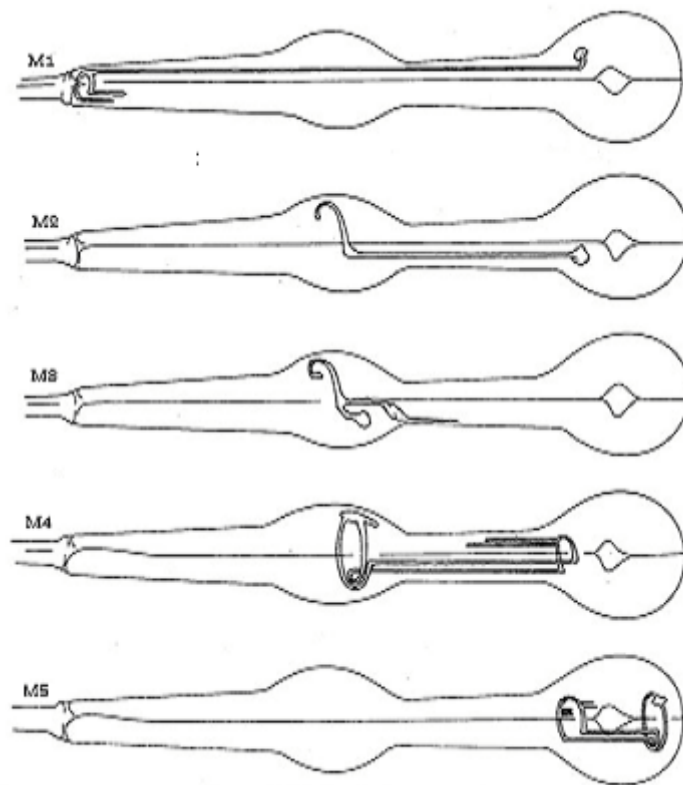


図 2 - 3 : 運動ニューロン

図 2 - 3 には 5 つの運動ニューロンがしめしてある。運動ニューロンとは筋肉細胞と直接結合しているニューロンであり、筋肉の活性化を制御している。また M 2 , M 3 は左右対称の 2 つのニューロンから構成されている。

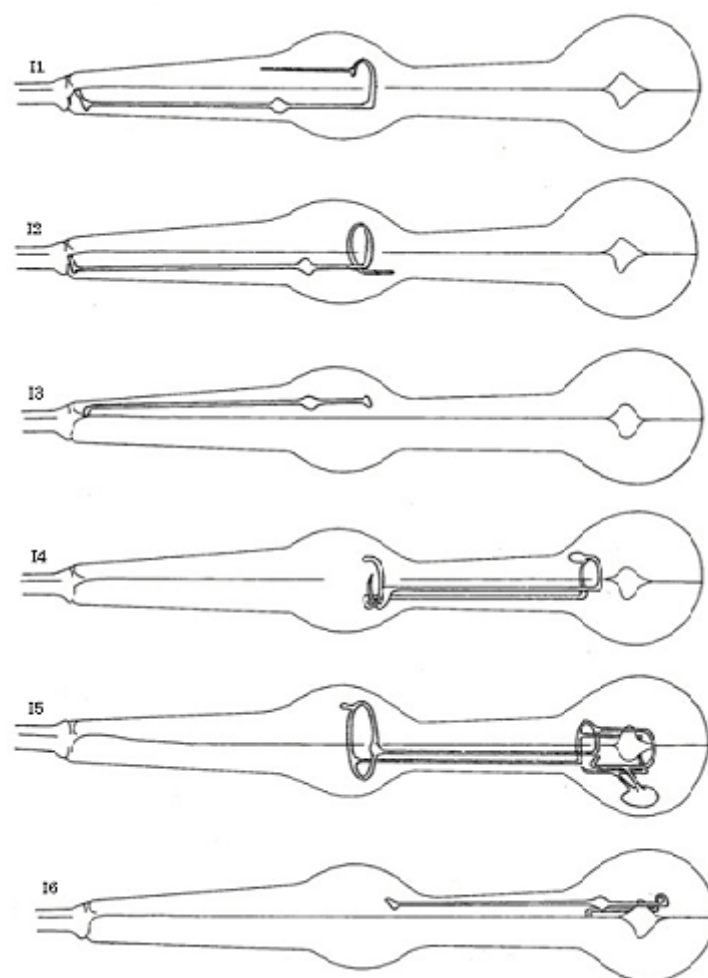


図 2 - 4 : 介在ニューロン

図 2 - 4 には 6 つの介在ニューロンがしめしてある。介在ニューロンとはニューロン間同士でのみ結合しているニューロンのことである。介在ニューロンのうち、I 1、I 2 は左右対称の 2 つのニューロンで構成されている。

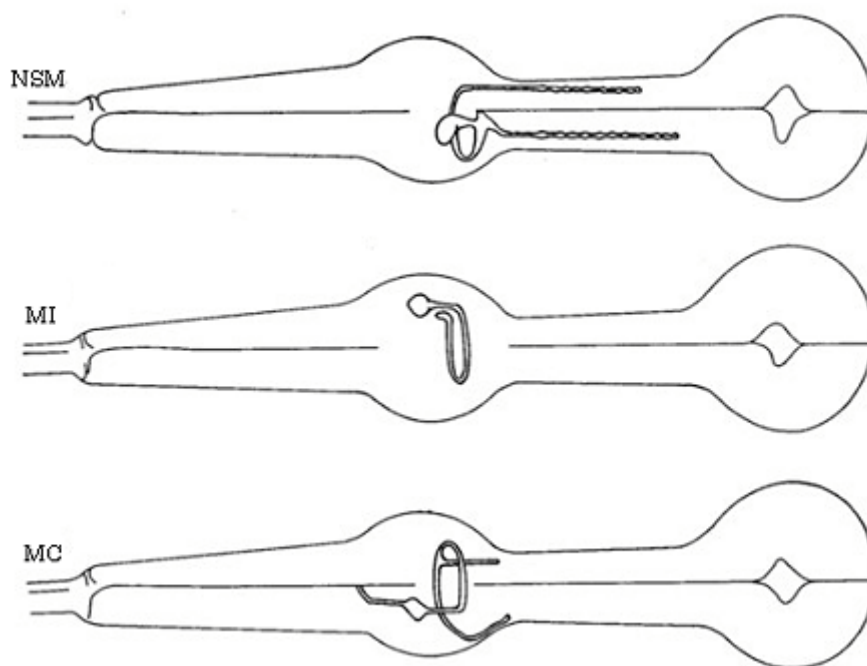


図 2 - 5 : その他のニューロン

図 2 - 5 はその他のニューロンをしめしている。NSM、MI、MCそれぞれが 2 つのニューロンで構成されている。

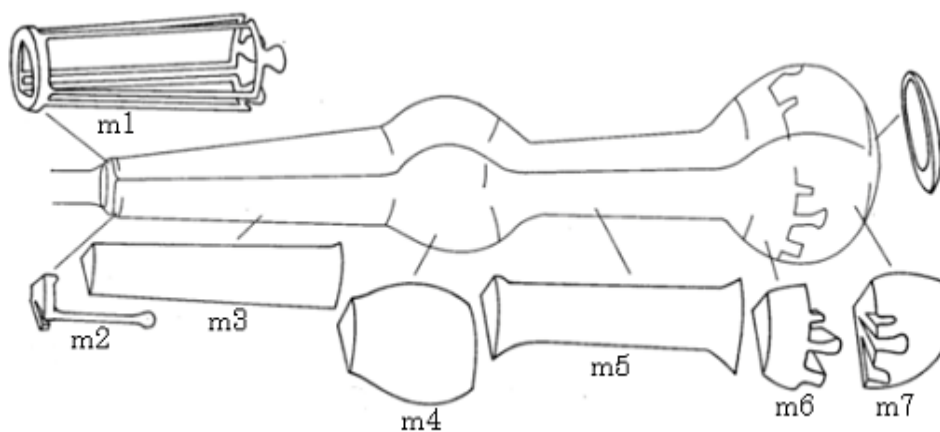


図 2 - 6 : 咽頭部筋肉

図 2 - 6 は咽頭部の筋肉の構成をしめた図である。

2 - 3) 咽頭部ニューロンの結線

■ 運動ニューロン ■

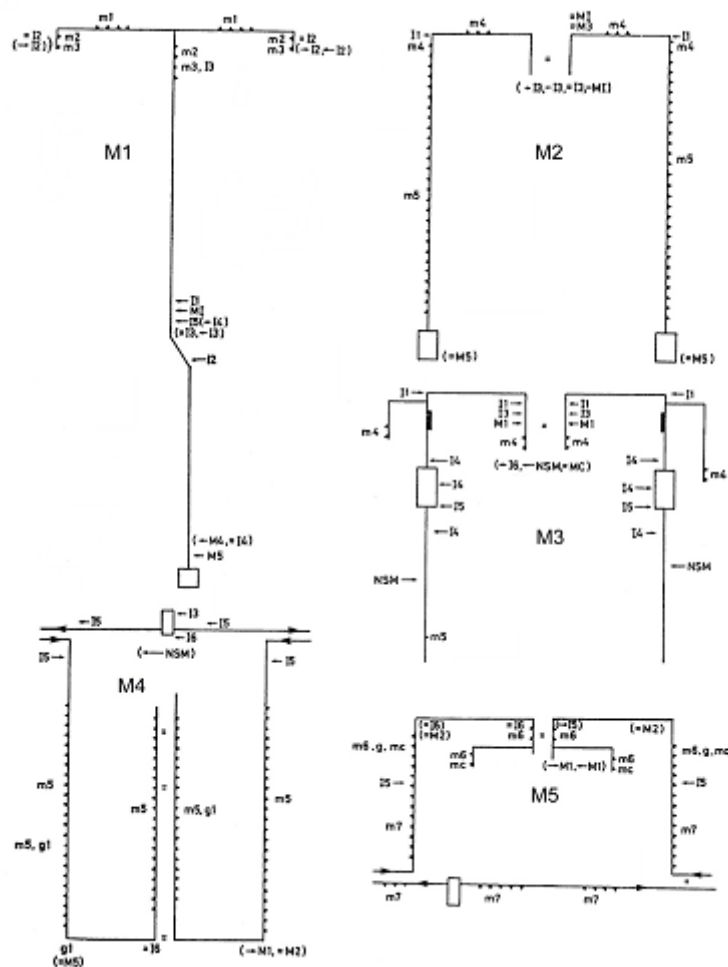


図 2 - 7 : 運動ニューロンの結線図

図 2 - 7 は M 1 ~ M 5 の運動ニューロンの結線情報をあらわした図である。▲は筋肉との結合 (muscle synapse を介した結合) である。→、← はニューロン同士の結合 (chemical synapse を介した結合) である。= は junction gap を介した結合をあらわしている。□は細胞体である。

■ 介在ニューロン ■

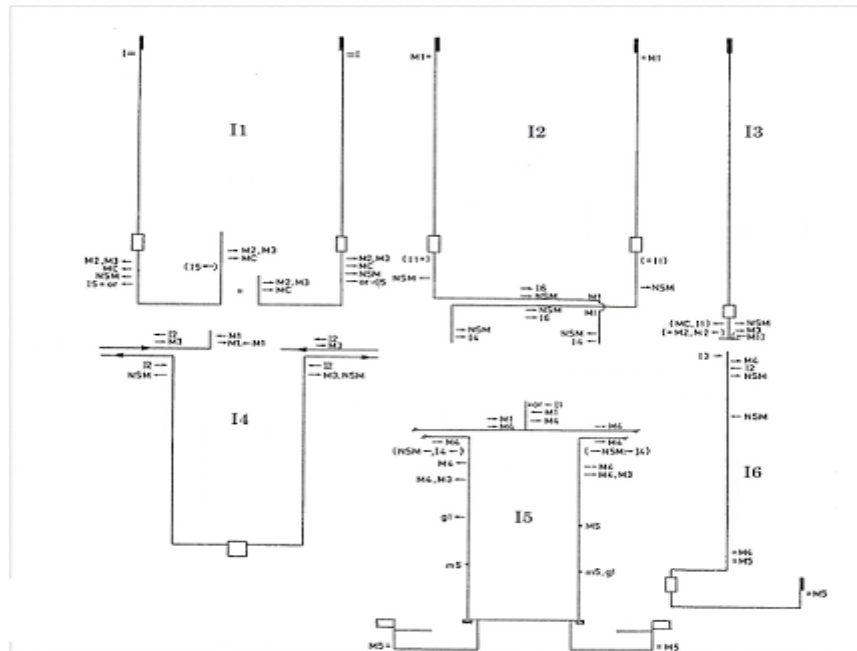


図 2 - 8 介在ニューロンの結線図

図 2 - 8 は I 1 ~ I 6 の介在ニューロンの結線情報をあらわした図である。

■ その他のニューロン ■

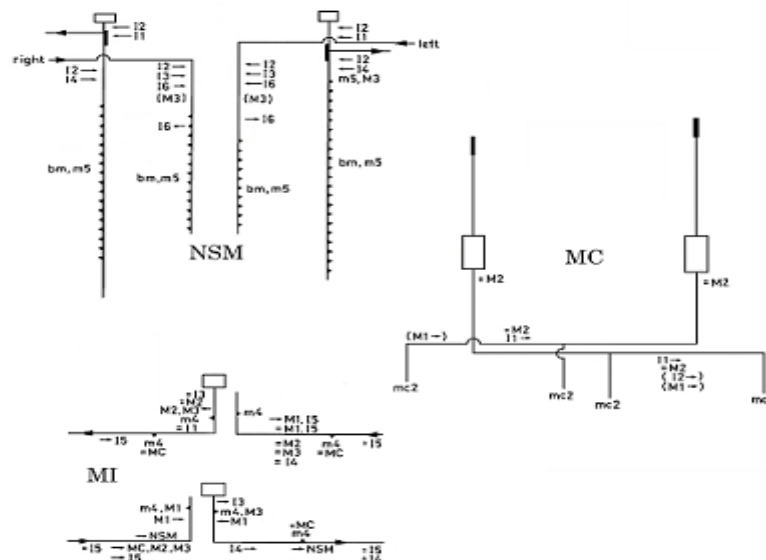


図 2 - 9 : その他のニューロンの結線図

図 2 - 9 は N S M、M I、M C のその他のニューロンの結線情報である。

2 - 4) 線虫のニューロンの結線方式

線虫のニューロンの結線方式には「muscle synapse」というシナプスを介したものと、「chemical synapse」を介したものと、「junction gap」を介したものの三種がある[8]。

muscle : ニューロンと筋肉の結合

chemical : ニューロン同士の結合

junction gap : 接近しているが結合はしていないニューロン同士の弱い結合

これら三種の結合の強さの違いは以下になる。

muscle : 筋肉からの入力信号でもっともニューロンに大きな影響を与える

chemical : ニューロン同士の入力信号で、影響は大きいが muscle より小さい。

junction gap : 他の、または同種のニューロンと接近してはいるが結合はしていないので、もっとも影響がすくない。

よって、各結線方式に対応する重みの関係は

$$\text{muscle} > \text{chemical} > \text{junction gap}$$

となる。(* 実際には同じ結線方式でも重みが違う場合があると思われるが、シミュレーションの上では、各結線方式で重みを統一した。)

3．線虫ニューロンのデータベース化

3 - 1) データベースとは

データベースとはデジタル化された大量の情報をコンピュータに蓄積しておき、必要なときに必要なデータを取り出すことのできるようにデータを管理、保存しておくためのソフトウェアのことである。ニューロンの結線情報のデータベース化にはリレーショナルデータベースによる整理がむいている。管理の対象を実体（エンティティ）、エンティティの持っている特性を属性（アトリビュート）、エンティティ間の関係を関係（リレーションシップ）という。エンティティ、アトリビュート、リレーションシップの関係を図3 - 1 にしめす。

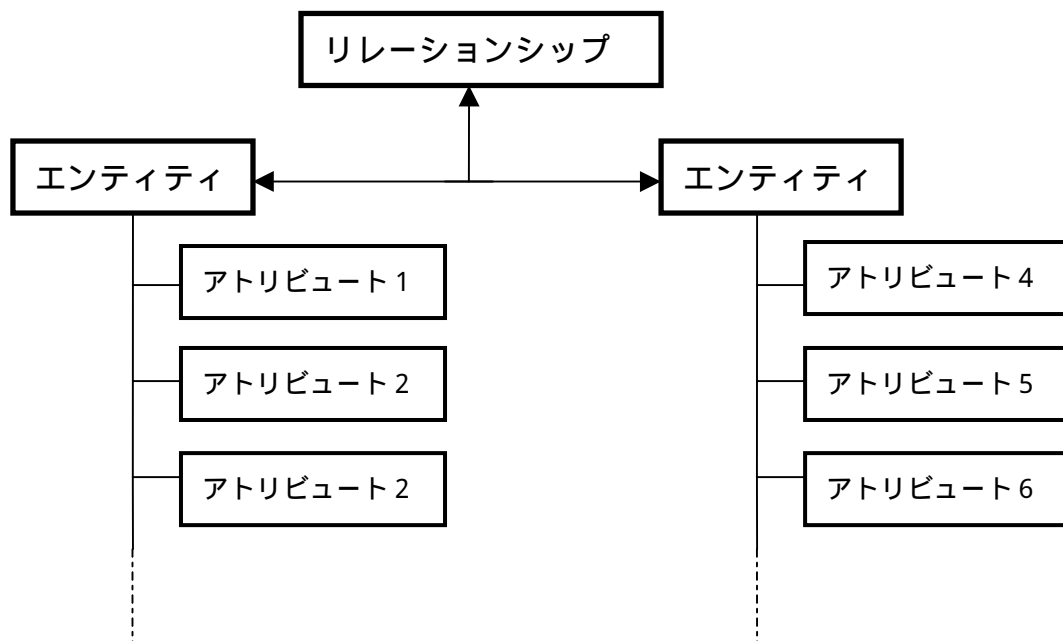


図3 - 1：概念関係図

3 - 2) データベースの利点

データベースを使用する利点としては、次のものがあげられる。

大量なデータの迅速な処理が行える

キーワードをもとに関係するデータを得ることができる

目的に応じて利用できる

データの更新が容易に行える

本研究では信号伝達シミュレーションを行うために必要な重みのマトリクスの構築に目的を定めてデータベース化を行う。

3 - 3) データベースのシステム

本研究で作成するデータベースは次の3つのシステムで構成されている。

データファイル

データファイルはニューロンの結線情報をコード化して保存、管理をしておくところである。

処理プログラム

処理プログラムでは、データファイルより神経系内部ニューロンテーブルと神経系外部ニューロンテーブルを抽出し、内部ニューロンと外部ニューロンのそれぞれの結線方式を重みに変換し、マトリクスの構築を行うところである。

特性解析プログラム

特性解析プログラムでは、処理プログラムで構築した重みのマトリクスを

用いて、ニューロンが時間の発展に伴ってどのように発火していくかをシミュレーションするところである。データベースのシステム構成を図3 - 2にしめす。

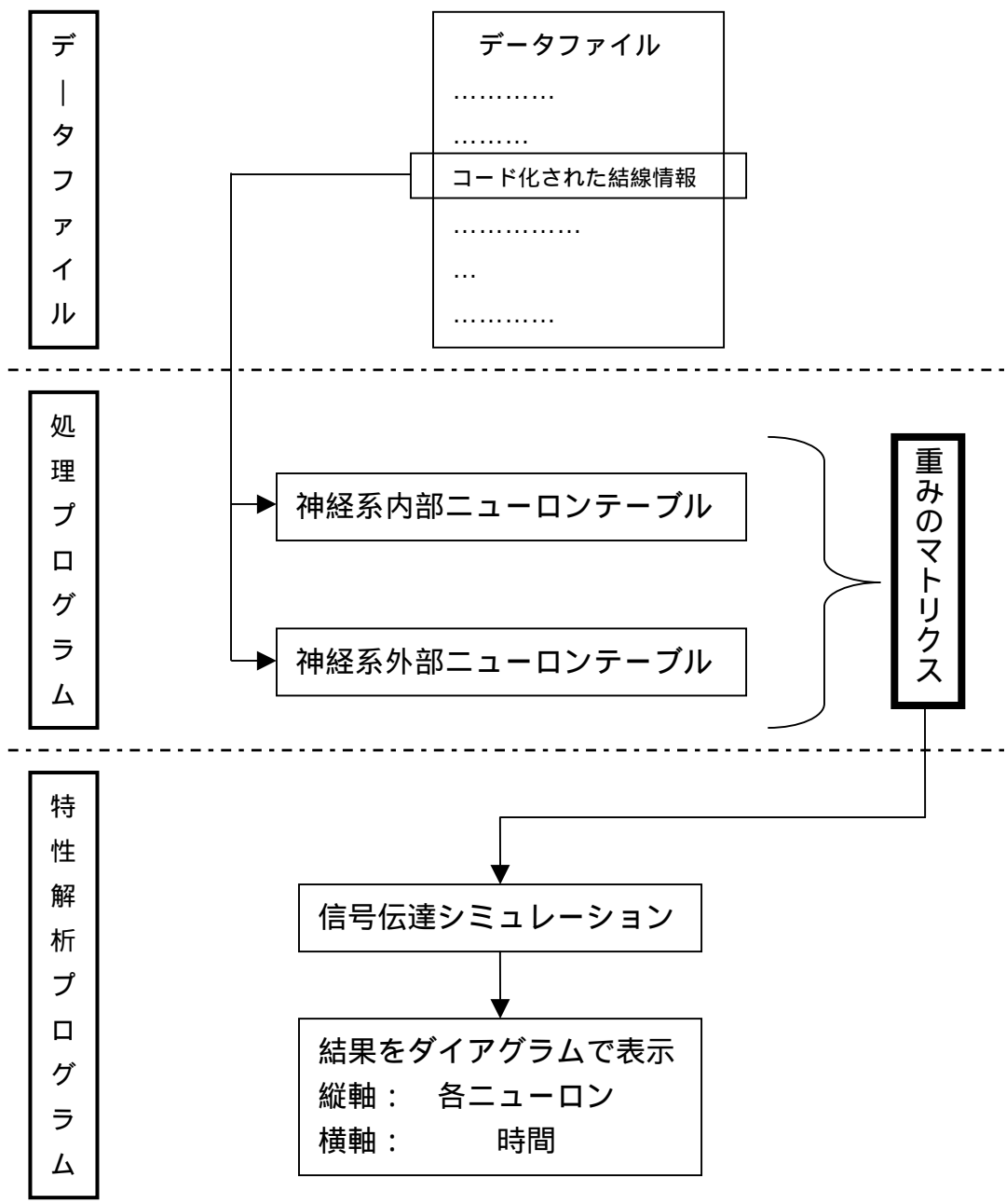


図3 - 2：データベースのシステム

3 - 4) 概念設計

データのコード化にあたり、まず概念設計をおこなう。概念設計とは、エンティティ、アトリビュート、リレーションシップが何であることを定義することである。本研究のデータベースにおいて、管理の対象は各ニューロンである。またそのニューロンが持っている属性として、ニューロンの種類や結線方式があげられる。また各ニューロン間には、ニューロン同士が muscle, chemical, gap のいずれかの結線方式で結線しているという関係が成り立っている。以上より、エンティティ、アトリビュート、リレーションシップを次のように定義する。

エンティティ	各ニューロン
アトリビュート	ニューロンの種類、結線方式
リレーションシップ	結線情報

3 - 5) データのコード化

データファイルに結線情報を保存し、またデータファイルから結線情報を抽出するためには結線情報をコード化する必要がある。コード化とは、各アトリビュート、リレーションシップをそれぞれ記号化することであり処理上データファイルからデータを抽出するために必要なことである。各アトリビュートのコード化を図 3 - 3 にしめす。

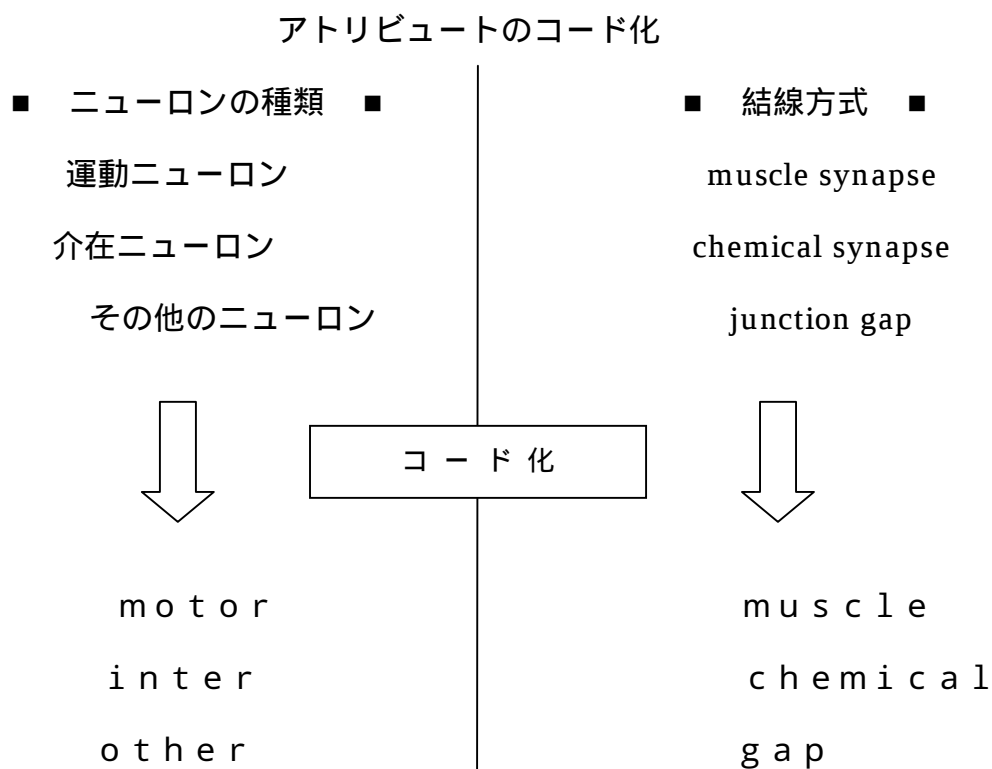


図3 - 3 : アトリビュートのコード化

次に、リレーションシップのコード化を行う。リレーションシップ、即ち結線情報をコード化することとは、1．どのニューロン(エンティティ)に、2．どのニューロン(エンティティ)が、3．どのような結線方式で結線しているかをコード化することである。この3つの条件を満たすコード化の方法として、次のようなコード化を提案する。(図3 - 4)

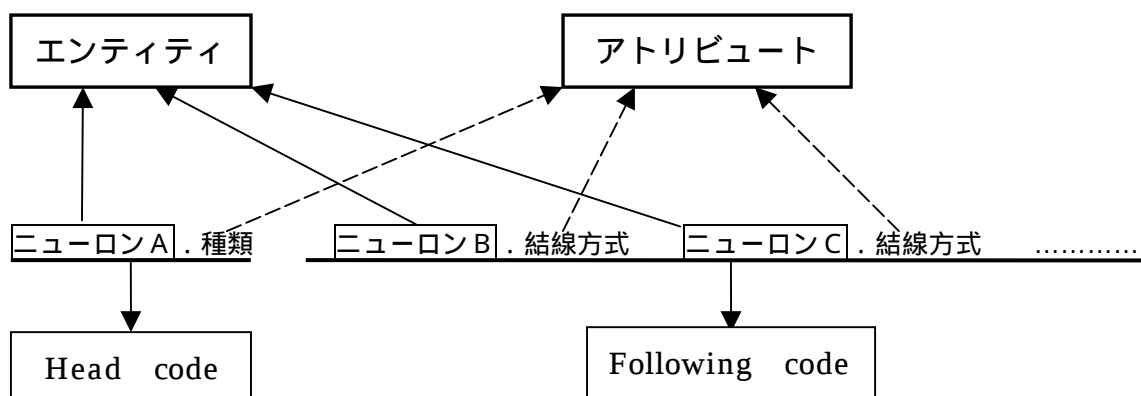


図3 - 4 : リレーションシップのコード

表3 - 4において、Head code はニューロンとそのニューロンの種類を表している。Following code は Head code のニューロンに結線しているニューロンとその結線方式をあらわしている。このようにコード化をおこなえば Head code のニューロンと Following code の各ニューロンの関係、つまり結線情報をコード化できたといえる。このコード化方法にのっとり線虫咽頭部のM 1 というニューロンをコード化してみると、

M1.motor m1.muscle m2.muscle m3.muscle M4.chemical M5.chemical

となる。このコード化方法で線虫ニューロンのコード化を行っていき、データファイルを作成する。

3 - 6) 処理プログラム

信号伝達のシミュレーションを行うためには、神経系内部ニューロンと神経系外部ニューロンのそれぞれの重みを取り出す必要がある。処理プログラムではデータファイルより内部と外部のニューロンを別々に抽出し、得られた内部ニューロンテーブルと外部ニューロンテーブルの各ニューロンの結線方式を重みに変換する処理を行う。神経系内部ニューロンとはある器官内部のニューロンのことをいい、神経系外部ニューロンとは神経系内部ニューロンに器官外から結線しているニューロンのことをいう。データファイル上では、Head code のニューロンを内部ニューロンとして抽出

し、Following code には載っているが内部ニューロンテーブルには載っていないニューロンを外部ニューロンとして抽出する。処理プログラムの概要図を図 3 - 5 にしめす。

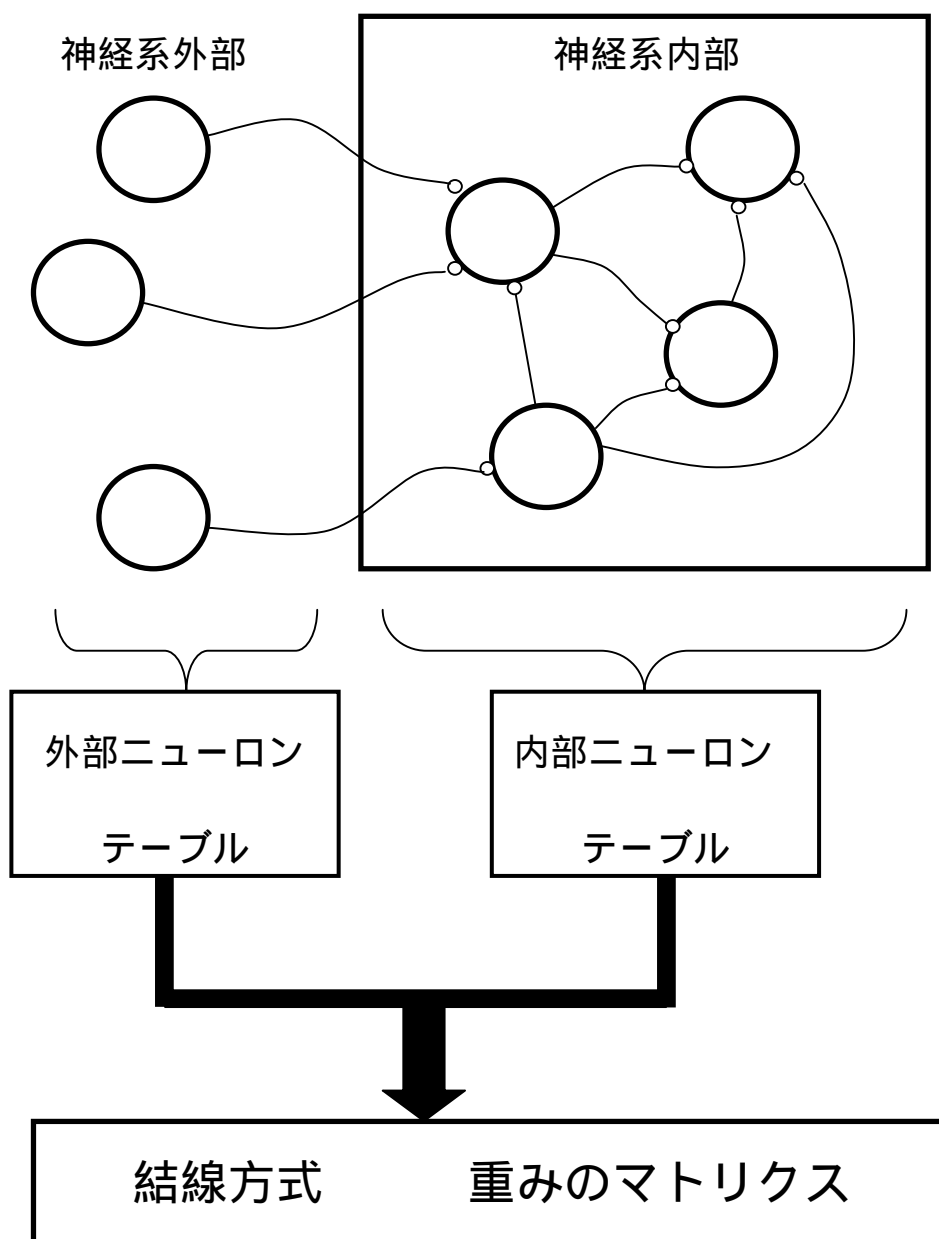


図 3 - 5 : 処理プログラム概略図

3 - 7) 特性解析プログラム

特性解析プログラムでは、処理プログラムで得られた重みのマトリクスを用いてニューロンが時間発展にともなってどのように発火するかシミュレーションを行う。また、シミュレーション結果をダイアグラムで表示する。

■ シミュレーション方法 ■

内部ニューロンと外部ニューロンを出力値ランダムで発火させる。

の出力値を重みのマトリクスを介して内部ニューロンテーブルの各ニューロンに入力する。

(もしくは) の結果、各内部ニューロンは発火して 1 を出力するか発火せずに 0 を出力する。

の出力結果を再び重みのマトリクスを介して各内部ニューロンに入力する。



を繰り返す。これが時間発展を表している。

■ シミュレーションにおける計算方法 ■

各内部ニューロンからの出力、各外部ニューロンからの出力に 0 ~ 1 までのランダムな数値を与える。

で与えられた数値を下の式に代入し、各内部ニューロンへの入力値をもとめる。

$$\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \text{各内部ニューロンへの入力} \\ m \times 1 \end{array} \right] \\ \\ \left[\begin{array}{c} \text{内部ニューロンに対応する} \\ \text{重みのマトリクス} \\ = \\ m \times m \end{array} \right] \\ \\ \left[\begin{array}{c} \text{各内部ニューロンからの出力} \\ m \times 1 \end{array} \right] \\ \\ \left[\begin{array}{c} \text{外部ニューロンに対応する} \\ \text{重みのマトリクス} \\ + \\ m \times n \end{array} \right] \\ \\ \left[\begin{array}{c} \text{各外部ニューロンからの出力} \\ n \times 1 \end{array} \right] \end{array}$$

ここで各重みの値は、

$$\text{muscle} = 0.4 \quad \text{chemical} = 0.2 \quad \text{gap} = 0.15$$

とした。

計算より得られた入力値をニューロン関数に代入し、各内部ニューロンからの出力値をもとめる。入力値をそれぞれ $A_1, A_2, \dots, A_m$ 、各ニューロンからの出力値を $N_1, N_2, \dots, N_m$ 、閾値 $\theta = 0.5$ とすると、

$$N_i = f(A_i) \quad N_i = \begin{cases} 1 & (A_i \geq \theta) \\ 0 & (A_i < \theta) \end{cases}$$

となる。

で得られた出力値を下の式に代入する。

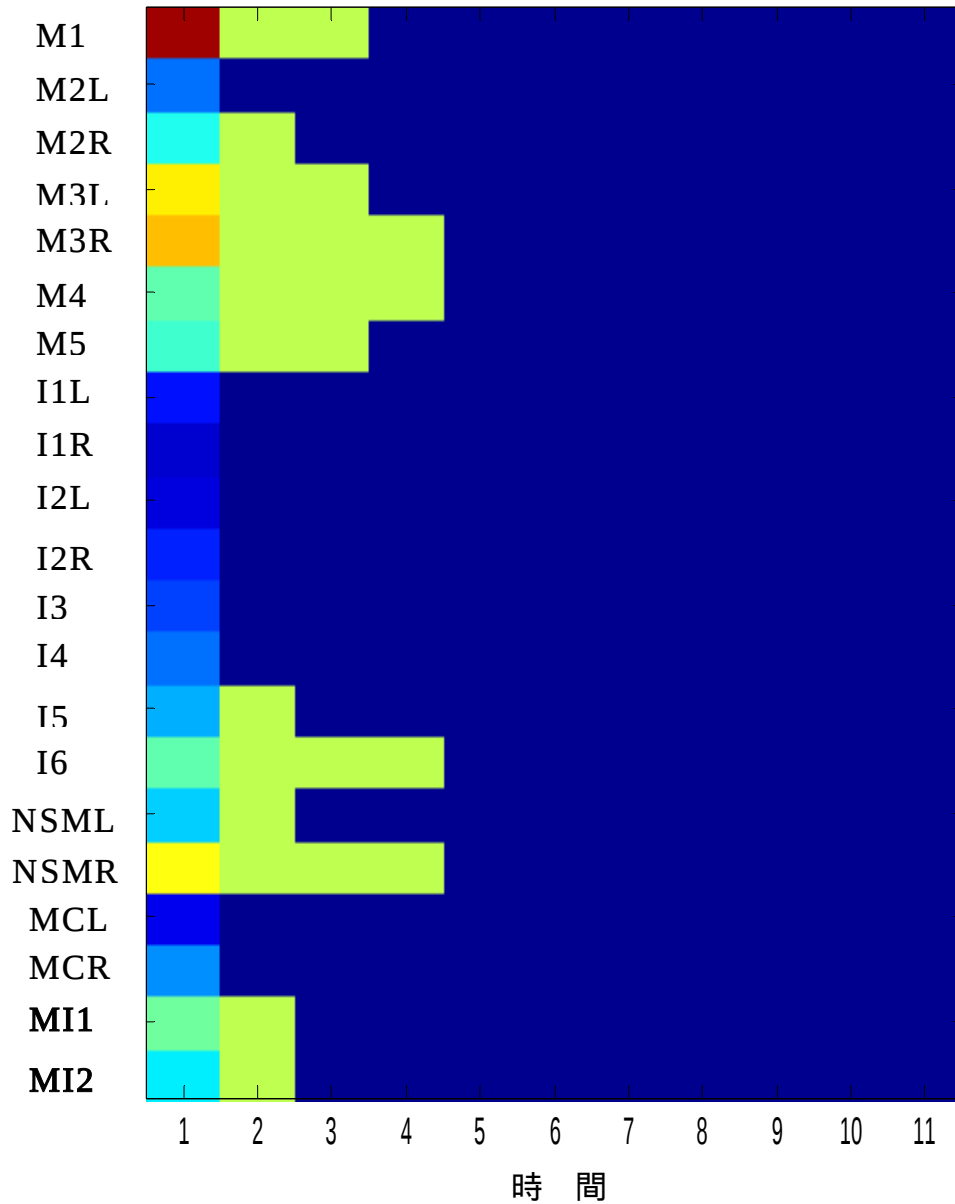
$$\begin{bmatrix} \text{各内部ニューロンへの入力} \\ m \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{内部ニューロンに対応する} \\ \text{重みのマトリクス} \\ = \\ m \times m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N1 \\ N2 \\ \vdots \\ Nm \end{bmatrix}$$

と の計算をループさせる。

■ 特性解析結果 ■

特性解析プログラムでは特性解析結果としてニューロンの発火状況をダイアグラムで出力する。このダイアグラムの縦軸は各内部ニューロン、横軸は時間に対応しており、時間軸上で発火しているニューロンを明るい色で表示し、発火していないニューロンを暗い色で表示している。ここでいう発火とは計算手順 の出力結果が1のときのことであり、出力結果が0ならば発火していないことになる。また時間軸の1は各内部ニューロンへの初期入力値の大きさを色別で表示している。初期入力値が大きいニューロンほど明るい色で表示される。例として線虫咽頭部の特性解析ダイアグラムを図3 - 6に示す。

図 3 - 6 : 特性解析ダイアグラム



初期入力値

M1=1.7748 M2L=0.4187 M2R=0.7095 M3L=1.1732 M3R=1.2473
M4=0.8413 M5=0.7739 I1L=0.2339 I1R=0.1135 I2L=0.1453
I2R=0.265 I3=0.3157 I4=0.4021 I5=0.5076 I6=0.8214 NSML=0.5761
NSMR=1.1109 MCL=0.1937 MCR=0.4774 MI1=0.8646 MI2=0.6321

考察

特性解析ダイアグラムより、初期入力値が高いニューロンが時間軸 2 で発火していることがわかる。また、M1、M3L、M3R、M4、M5、I6、NSMR が比較的長時間発火している。M1、M3L、M3R、M4、M5、I6、NSMR のそれぞれに結線していニューロンの数とその結線方式をあげてみると、

M1 : muscle × 3、chemical × 1 1、gap × 4

M3L : muscle × 2、chemical × 6、gap × 2

M3R : muscle × 1、chemical × 6、gap × 2

M4 : muscle × 1、chemical × 5、gap × 4

M5 : muscle × 2、chemical × 2、gap × 4

I6 : muscle × 0、chemical × 6、gap × 2

NSMR : muscle × 1、chemical × 8、gap × 0

となっている。まったく発火していないニューロン（例として M2L、MCL、MCR）への結線ニューロン数とその結線方式をあげてみると、

M2L : muscle × 2、chemical × 2、gap × 3

MCL : muscle × 0、chemical × 2、gap × 0

MCR : muscle × 0、chemical × 3、gap × 0

となっている。発火しているニューロンと発火していないニューロンを比較してみると、結線ニューロン数の違いがわかる。この結線ニューロン数の違いがダイアグラムに反映されて表示されている。また、比較的発火しているニューロンは、発火しているニューロン同士で結線している場合が多い。

以上より、特性解析ダイアグラムを読み取ることで結線ニューロン数の大まかな数と、発火ニューロン同士どうしの結線、つまり信号が流れ易い経路などがわかる。

4．研究結果と今後の課題

生物学的に神経回路網が詳しく調べられている線虫に注目し、その結線情報をデータベース化しました。このために、データファイル、処理プログラム、特性解析プログラムを試作しました。データファイルは、線虫情報をコード化したもので、ここから重みのマトリクスを抽出するのが処理プログラムです。このとき、データファイル内のニューロンと外部から入力するニューロンをそれぞれ内部及び外部ニューロンとして区別します。この区別によりデータの追加、削除が矛盾なく行い得ます。特性解析プログラムは、ニューロンの時間的な発展を追跡するものです。

今回は咽頭部に限ってデータを作成しましたが、線虫の全ニューロンをデータベースかすることが可能です。また、学習則を用いてシミュレーション結果より重みを繰り返し評価し、適正な重みを決定していくことも今後の課題です

参考文献

[1]井上高弘の紹介、研究紹介

<http://www.eecs.kumamoto-u.ac.jp/.eecs/labs/inoue-lab/members/Prof.inoue/show.html> (2001)

[2] Annual report FY 1997 ISIT/KYUSHU

<http://www.isit.or.jp/annual-rep97/research.html> (1997)

[3]上野響一 「線虫神経回路網の集積回路化を目指した信号伝達解析」
山梨大学機械システム工学科卒業論文 (2002)

[4]吉田直弘 「線虫神経回路網の集積回路化」
山梨大学機械システム工学科卒業論文 (2002)

[5]D.G.Albertson and J.N.Thomson , “The Pharynx of Caenorhabdits”,
Philosophical Transaction of the Royal Society of London B.,
Vol.275 (1976), pp.299 - 325

[6]C.Mead, “Analog VLSI and Neuron System”,
Addison - Wesley Pub.Comp. (Massachusetts 1989)

[7]線虫写真館

<http://www.nig.ac.jp/museum/livingthing/sentyu/sentyu-00-2.html>

[8]F.Delcomyn , “Foundation of Neurobiology”,
W.H.Freeman and Company , (1998)