

脳の神経回路モデル

電気通信大学 情報通信工学科 西野研究室

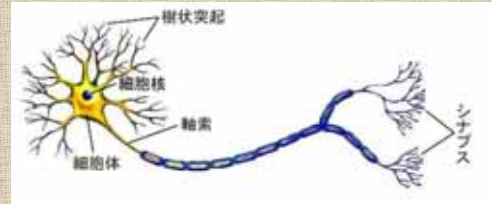
脳の神経回路

人間の脳には、ニューロンと呼ばれる神経細胞が一千億個以上存在しているといわれています。ニューロンは互いに非常に複雑な結合を形成していることが知られており、この結合が人間の脳での複雑な情報処理を行っていると考えられています。

ニューロンは右図の様な構造をしています。細胞体から軸索と呼ばれる枝状の部位が伸びだし、他のニューロンと結合しています。この結合部をシナプスと呼びます。

全てのニューロンはそれぞれ閾値(しきい値)と呼ばれる値をもっており、他の1つ以上のニューロンからの刺激の総和が閾値を超えたとき、そのニューロンは興奮(発火)状態になり自身も他の細胞に対して刺激を送り出します。

この様にして次々に刺激が伝わっていきます。

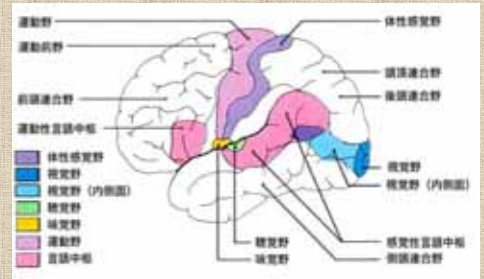


ニューロンのネットワーク

人間の脳は、上のような非常に大規模なネットワークで構成されています。

物を見たり、言葉を理解するといった機能はすべて、このニューロンのネットワークにより実現されています。

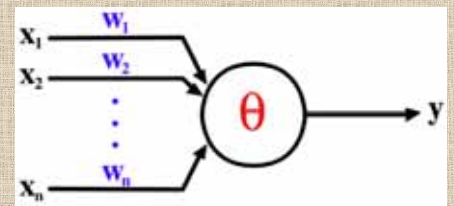
また、人間の脳ではその機能によって活発に活動する部位が分かれていることが知られています。右の図は、脳の部位が担っていると考えられている機能を図示したものです。



ニューロイダルネット

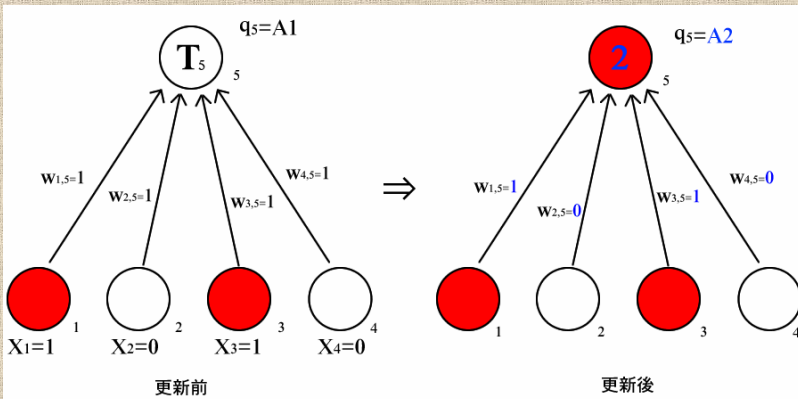
ニューロイダルネットは、L.G.Valiantにより定義されました。ニューロイダルネットでは各ノードのことを「ニューロイド」と呼びます。このニューロイドは線形しきい値素子に、「状態」と簡単な「タイミング」メカニズムを組み込んだものです。

線形しきい値素子を右図に示します。この素子は、入力 x_i と重み w_i を掛け合わせ、その合計がしきい値以上であれば1を、そうでなければ0を出力するという動作をします。



ニューロイダルネットを定義するのに必要な要素は、以下の5項目となります。

- G : $G = (V, E)$ で表される有向グラフ
- W : グラフの各辺が持つ重み
- X : (q, T) で表されるモードの集合
- q : 状態, T : しきい値
- : モード更新関数
- Xを更新するための条件式
- : 重み更新関数
- 重みを更新するための条件式



左図は、ニューロイダルネットと、その更新を表したものです。左のニューロイダルネットに以下の更新関数を適用すると、右のニューロイダルネットに更新されます。

$$\{q_i = A1\} \rightarrow \{q_i = A2, T_i = w_i, \text{ (モード更新関数)}\}$$

$$\text{if } f_i = 0, w_{ij} := 0 \text{ (重み更新関数)}$$

ここで、 w_i は w_{ij} の総和を表し、 f_i はj番目のニューロイドが発火しているとき1、そうでないとき0を表すものとします。

文章で説明すると次のようになります。

ニューロイドの状態がA1ならば、状態をA2に、しきい値を w_i に更新せよ(モード更新)。また、発火していないニューロイドからの辺の重みを0にせよ(重み更新)。

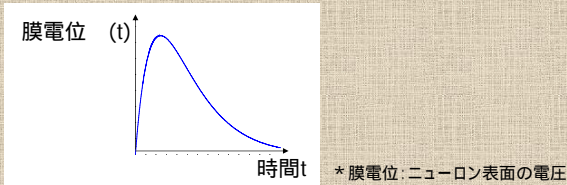
この更新により、ニューロイダルネットは論理回路で言うところの1番目と3番目のニューロイドの「AND」を学習したことになります。同様に「OR」や「NOT」の学習もできるため、ニューロイダルネットは少なくとも論理回路と同等の計算能力を持つと考えることができます。

脳機能のモデル化

電気通信大学 情報通信工学科 西野研究室

Leakyモデル

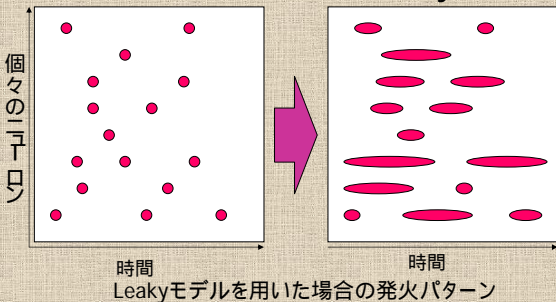
先行研究で用いてきたニューロンモデルは、一度発火するとしばらく発火できませんでした。このLeakyモデルを用いると発火状態を持続させることができます。実際のニューロンは、持続的に発火しているため、Leakyモデルを用いることで、より実際の脳に近いモデルが作成できるのではないかと考えています。



Leakyモデルによる膜電位のグラフ

先行研究のモデル

Leakyモデル



ニューラルスタック

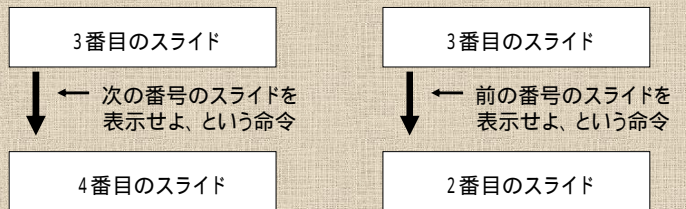
人間が普段しゃべっている文章には「埋め込み文」が存在していることが知られています。この「埋め込み文」を理解したり、作り出したりするためにはスタックという構造が必要になることが知られています。

私たち人間はこの「埋め込み文」を日常的に使っているのですから、脳の中にはこのスタックという構造が存在することが期待できます。そこで、ニューロンを用いてこのスタック(またはそれに類する構造)を実現できないかと考えています。

「埋め込み文」の例

彼は、私がリンゴを食べるのを見た。

いまは、スタックを実現する前段階として「スライドショー」というものの実現を目指しています。「スライドショー」については次の図をご覧ください。



* スライドはあらかじめ用意しておく。

現段階では、あらかじめ用意したスライドを順序付けて表示するだけです。スタックとは異なります。スタックの実現のためには、与えられたスライドを覚えたり、逆に忘れておくことも必要です。これについては今後研究をすすめていきます。

反射性眼球運動

小脳モデル

運動制御は小脳で行われていると考えられています。

小脳の表面付近には、規則正しい構造で神経細胞が密集する小脳皮質と呼ばれる領域が存在します。小脳皮質内には、5種類の神経細胞が存在し、小脳核や下オリーブ核といった神経細胞群と結びつくことで、皮質核微小複合体と呼ばれる構造を形成しています。

小脳皮質のプルキンエ細胞のシナプスでは、平行線維からの入力と、誤差信号の相互作用によって長期抑圧(LTD)が生じます。この長期抑圧によって入出力特性が変化することにより、小脳の学習が行われます。

当研究室では微小複合体のシミュレータを作成し、小脳の学習機能についての研究を行っています。具体的には以下の瞬目反射反応、反射性眼球運動という反射運動をモデル化するのが目的です。

瞬目反射反応

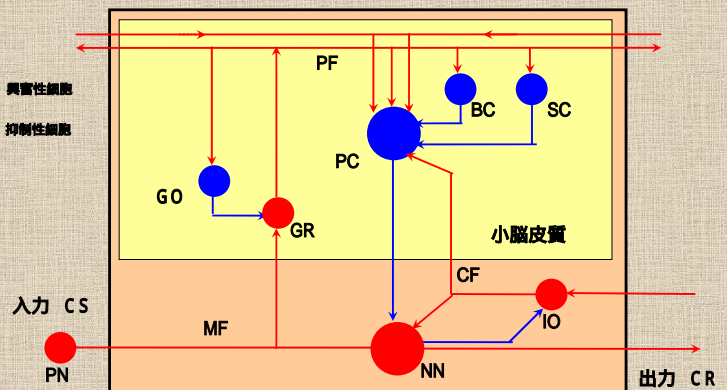
小脳の機能解明をする目的で行われている神経生理学実験の一つに、瞬目反射実験(eyelid conditioning)があります。

実験では動物に条件付けではない刺激(US)として目にエアパフをあて、まぶたを閉じさせます。次に条件付けさせる刺激(CS)として音を聞かせます。この2つの刺激を繰り返し与えることによって、音を聞くだけでまぶたを閉じるような条件反応(CR)を起こすようにします。

- CS(音)とUS(エアパフ)の連合性によって、CR(まぶたを閉じる)の習得がなされる。
- CR(まぶたを閉じる)が適切なタイミングで起こる。
- 習得後US(エアパフ)を与えずCS(音)のみを与えることにより、CR(まぶたを閉じる)が消失する。
- 一度習得したCR(まぶたを閉じる)はすぐに再現できる。

反射性眼球運動

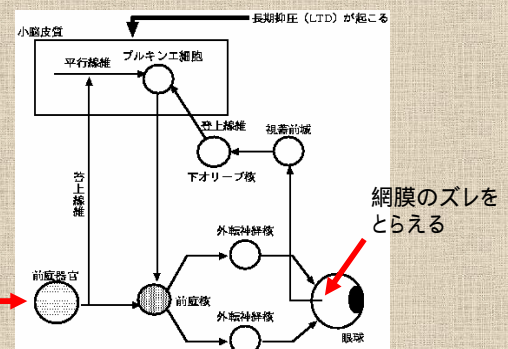
小脳で制御されている反射運動に反射性眼球運動があります。反射性眼球運動とは身体の運動や視対象の動きに伴う網膜像の滑りをおさえる運動です。反射性眼球運動には前庭動眼反射、視機性眼球運動の二つの反射運動があります。



PC: プルキンエ細胞 GR: 顆粒細胞 GO: ゴルジ細胞 SC: 星状細胞
BC: バスケット細胞 NN: 小脳核/前庭核 PN: 小脳前核
IO: 下オリーブ核 PF: 平行線維 MF: 拳状線維 CF: 登上线維



CS(音)とUS(エアパフ)の与え方



反射性眼球運動のモデル