

【論文】

意味ネットワークの神経回路網モデル

嶋津 好生

Neural Network Model for Semantic Network

Yoshio SHIMAZU*

A neural network model for the semantic network is proposed and is applied to the connectionist Japanese understanding and producing system. The sensory-motor system and the language system are connected on the artificial neural network and the ecological intelligence for the brain of the robot is realized.

Key words: Japanese understanding and producing system, Semantic network, Self organizing feature map, Self correlation Hopfield model, Predictive learning Elman network

1 緒言

意味ネットワークとその活性拡散モデルは、心理学における連想実験からもたらされた。神経回路網モデルと安易に混同してはならない。理論としての歴史もシステム特性も別のものとして区別すべきである。しかし、連想ネットワークはわれわれが保有する知識の一つの顕れであり、また、ことばによる連想が意識された精神活動であることに疑いを差し挟むことはできない。そこで、意味ネットワークの神経回路網モデルを考えることができるなら、知覚、意志、感覚、思考、行動あるいはまた言語などの精神活動と脳との関係を探ることができるのではないかと考えた。本稿では、意味ネットワークを単なる連想の場と考えるのではなく、意識的な精神活動の座へと拡大解釈することになる。

2 神経回路網の自己組織化

脳にはおよそ二百億個の神経細胞が存在し、それらはそれぞれ一万個にも及ぶ別の神経細胞と結合しているというから、膨大な規模の回路網を形成していることになる。二百億個の神経細胞のうち一千万個が感覚入力受容の役割を、もう一千万個が身体運動制御信号出力の役割を担っている。回路網に対するこの入出力系列がその人の生涯を意味している。そして紆余曲折はあっても、とにかく生存を保ち得たからには、その入出力系列による神経回路網の自

己組織化が十分に有効であったことを意味している。概念形成やパターン認識、行動計画の獲得や言語の発達などはその成果なのである。

2・1 知覚・運動野

感覚入力は重要な入力情報である。神経回路網では入力細胞から幾筋もの階層型ネットが組み立てられ、低次から高次へ、パターン認識や概念形成など、一般性の獲得に利用されている。このような認識系は、神経回路網が、それによって世界内存在として環境に適応しえた入出力系列に基づいて自己組織化した結果、期せずして獲得されたものである。

感覚入力だけでは認識系は形成できない。眼で追うとか、耳を傾けるとか、舌鼓を打つなどの表現があるように、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚などの感覚入力は、神経回路網の中で感覚野の活性化だけで意味をなしているのではない。縦糸と横糸のように、運動野の活性化と協同して意味を織りなしている。感覚は運動を伴い、また運動は感覚を伴うのである。

2・2 神経細胞集合体

神経回路網のモデルを考えるとき、例えば脳を、はじめから一つの神経回路網モデルで考えるということはしないで、小規模の神経細胞集合体のさらなる集合体と考え、個々の小規模神経細胞集合体に神経回路網モデルを適用したもので組み立てる。

神経細胞集合体は二種類のベクトルと、一つの回

*電気工学科

路網構造体およびその学習則で表現される。ベクトルは、神経細胞活性値ベクトルとシナプス結合荷重ベクトルである。前者は集合体の瞬間々の活性状態を表し、後者は回路網構造体の現状を表して学習によって変化するものである。一つの神経細胞に他の細胞の活性値がシナプス結合を通して入力される。各入力に結合荷重を掛け、その総和を取って膜内電位とする。この細胞の活性値は、膜内電位を変数とするシグモイド関数で与えられる。神経細胞集合体活性値ベクトルは世界内存在として世界を切り取り写す鏡である。本稿では以下、活性値ベクトル表現を表象と称することにする。活性値ベクトル一つの表現を静的表象と称し、そしてその時間系列を動的表象と称する。

2・3 神経回路網モデル

回路網構造体とその学習則が神経回路網モデルを与える。学習則によってシナプス結合荷重が変化し構造体を変えるが、それは神経回路網の環境への適応や発達を意味する。よく使われる神経回路網モデルを紹介しておこう。

2・3・1 階層型ネットの誤差逆伝播学習

階層型ネットには誤差逆伝播学習則が適用される。入力層の表象がフィードフォワードに伝播して出力層で望ましい表象に変換されるように、実際の出力値と望ましい出力値との誤差を取り、この誤差が減少する方向に回路網の結合荷重を少しずつ変えていく。一般性を獲得するには学習がゆっくり進まなくてはならない。

2・3・2 エルマンネットの後続予測学習

動的表象の一般性を獲得するのに同じく階層型ネットを採用するが、構造にフィードバックを組み込む必要がある。エルマンネットがその一例である。ある時刻の中間層活性値ベクトルを、次の時刻、入力層の一部としてフィードバックする。学習には、誤差逆伝播学習則が適用できる。このエルマンネットを使ってどうすれば静的表象の時間系列を学習できるだろうか。時間系列の中のある静的表象が入力されたとき、その後続の静的表象を望ましい出力として、すなわち、次に続く静的表象を予測できるように訓練するのである。学習が収束すれば、系列の最後が入力されたときの中間層の活性値ベクトルを保存することによって、時間系列をいつでも再現できる。後続予測学習のエルマンネットは、動的表象の一般性を獲得できるだけでなく、動的表象を静的表象に変換でき、かつ静的表象から動的表象を再現することができるのである。

2・3・3 自己組織化特性地図

次にコホーネンの自己組織化特性地図を紹介する。自己組織化特性地図は入力層と競合層から成る。競合層は二次元平面上に配列された神経細胞群であり、細胞間は距離を持つ。入力層は静的表象を表す細胞集合体である。いろいろな静的表象が入力され続ける限り学習は継続されるのであるが、その学習アルゴリズムは、入力される度に最も強く活性化される細胞が決定されて、その近傍の細胞だけさらに強く活性化されるように結合荷重が少しずつ更新される。学習の進行に併せて学習率や近傍領域などのパラメータを次第に小さくしていくことで、結局、一つの静的表象が競合層の一つの細胞を活性化するようになるのだが、パラメータをそのように制御しなければ入力される表象同士競合しながら、類似性と頻度にしたがって領域を確保していく。類似した表象群は互いに近傍に集まり、また入力される頻度の高い表象は大きな領域を占めることになる。

2・3・4 相互結合型ネット

相互結合型ネットの活性拡散モデルとホップフィールドモデルにも言及しておこう。神経細胞集合体において、二つの細胞をどのように選んでもかならず双方向に結合があり、またどの細胞も自己ループを持たない、すなわち自己の出力を自己の入力とすることはなく、これを相互結合型ネットという。

2・3・5 活性拡散モデル

活性拡散モデルは、活性化された細胞からその活性値が結合方向にしたがって分散伝達されていき、いくつか細胞を経て拡散していくうちに活性値が消滅してしまうというものである。

2・3・6 ホップフィールドモデル

ホップフィールドモデルでは、神経細胞の活性値は二つの値だけで、活性状態か不活性状態かを区別する。したがって出力関数は二値の階段関数である。有限個の細胞集合体ではその活性状態は有限で数え上げることができる。ホップフィールドモデルはそのうちのいくつかを記憶できるという。それは記憶すべき活性状態の集合から細胞集合体の結合荷重行列を決定することで可能になる。記憶過程は、記憶したい活性状態が現れる度に結合荷重行列を更新することで瞬時に実行される。モデルには活性状態更新規則が与えられている。任意の初期状態から更新規則を適用していくと、記憶されている活性状態のうち一番近い状態に収束して、それ以上変化しなくなる。これを想起過程という。

3 知覚・運動野における概念形成

さていよいよ、からだやことばの大がかりなモデルづくりをはじめよう。概念形成は知覚運動野で行われる。感覚入力から静的表象のまま概念になることはないであろう。感覚入力の動的表象から一般性を獲得するため後続予測学習エルマンネットと自己組織化特性地図が働く。特性地図競合層の神経細胞は実は単一の細胞でない。その生物学的対応物は大脳皮質のコラムである。はじめ単一の細胞と見なした処理単位は相互に強い絆をもつ神経細胞のグループである。この処理単位に対して三つの神経回路網モデルを重畳適用することになるが、グループ内に別々の細胞が異なるモデルを分担すると考えればつじつまが合う。特性地図の処理単位は一般的概念を代表するが、その近傍の中に微小な違いを示す特定例の表象を数多く持っている。特性地図は概念の類似性を距離の近接性で示し、活性拡散モデルを適用することで意味ネットワークを表すことができる。特性地図の処理単位は意味ネットワークの結合関係で概念の内包を示すだけでなく、その近傍に特定例の集まりである外延を従えている。

3・1 ミラーニューロンと身体運動意味論

エルマンネットと特性地図の組み合わせを使って、次々にいくらかでも高次概念の形成が可能である。すなわち、低次の動的表象を変換して獲得した静的表象を使って作られたより高次の動的表象を捉え、そこから一般性を獲得し高次の静的表象を形成することができる。言語野では格構造の統括成分である動詞象徴の表象が重要な働きをするが、その動詞象徴に連合すべき動作概念は本質的に動的表象であるから、エルマンネットと特性地図の機構はとても重要な役割を担っている。

人の動作の意味を理解できるのは高次に形成された動作概念の働きである。動作概念には感覚入力から形成された周囲の状況と動作の動的表象が一緒に取り込まれている。また、動作概念からいつでも、それらの動的表象を再現することができる。このような認識系の高次レベルでは、人の動作と自分の動作とは微小な違いでしかない。認識系と身体運動系の共に高次の表象は同じ神経細胞が担っている。これをミラーニューロンという。認識系の仮想的身体運動は自らの実践的身体運動より先に形成される。模倣による実践的身体運動の獲得は仮想的身体運動の獲得の後からくる。実践的身体運動の仮想的身体運動による訓練は、一次運動野において行われる。一次運動野は身体運動制御信号を産出するところで

あるが、その神経回路網モデルとしては、コネクショニスト順序機械と別称されることもあるジョウダンネットが適役である。

3・2 エピソード記憶

記憶できるのは一般的知識だけではない。エピソード記憶、すなわち特定例をそのまま記憶するにはどんな機構が必要だろうか。自己組織化特性地図にホップフィールドモデルを重畳する。複数の特性地図の処理単位を一つのホップフィールドモデルの処理単位とみなし、複数の特性地図に掛け直る活性パターンを瞬時記憶させることができる。この機構で複数の活性パターンを短期記憶でき、活性拡散モデルの助けを借りれば、順序正しく想起される大きめの静的表象の時間系列、すなわち動的表象を、幾度も再現することができる。消滅しないうちにこれを繰り返す。後続予測学習エルマンネットを訓練して長期のエピソード記憶を形成することが可能である。

モデルの重畳に関連して神経調節に言及しておきたい。神経細胞の働きには神経伝達のほかに神経調整の働きがある。その種の細胞は神経生物化学物質を放出して神経伝達全般に瀰漫性の影響を及ぼす。神経回路網モデルにおける、モデルパラメータの調節や学習過程と想起過程の切り換え、モデル重畳機構のモデル選択などは神経調整の作用である。

4 言語野における象徴の働き

ことばは最高次の精神活動である。では、ことばの神経回路網モデルを紹介しよう。後続予測学習エルマンネットと自己組織化特性地図の機構によって、音声の周波数スペクトラムから音韻を、音韻系列から単語を獲得する。言語野は、音声から形成された象徴の表象を処理するところである。音韻の特性地図はたとえば、日本語と英語とでは当然違ってくる。単語の特性地図は知覚運動野に形成された概念の特性地図とヘッパ学習則によって連合する。ただし、単語は概念を担う概念語と格助詞とか助動詞とかの機能語に分けられ、知覚運動野にある概念の特性地図と連合するのは概念語のみである。機能語の表象は言語野において概念語の表象をあっちこっち転移させる機能を持っている。機能語の発達は言語野の発達に従う。これが語彙獲得の機構である。

言語野の働きは音声に基づく象徴の表象を使って構文構造と格構造の相互変換を行うことである。理解過程では構文構造を格構造に、産出過程では格構造を構文構造に変換する。理解過程の出力と産出過程の入力は同じく、すべての格要素の格納場所を

備えた細胞の集合体である。理解過程出力の動的表象で後続予測学習エルマンネットを訓練すれば複文構成規則を獲得する。言語野の主たる機能は象徴の格認識にあるから、言語野の高次過程では、それぞれの格に対して別々に象徴の特性地図を持つことになる。そのそれぞれの特性地図が、概念の特性地図と連合していることは言うまでもない。すべての格の特性地図に掛け互るホップフィールドモデルによって格構造の瞬時記憶を可能にし、複文を産出するときや特定文章を記憶するとき働く。

5 考察

われわれはこれまで、神経回路網モデルによる日本語理解・産出システムの構築を計ってきた。このシステムでは、理解部の出力および産出部の入力として格構造のあつまりを想定してきた。この格構造のあつまりを格構造パイルと称している。本稿は、新たにこの格構造パイルの座を神経回路網モデルで実現し日本語理解・産出システムを拡張したことになる。言語系が知覚・運動系に連合することになり、イメージに到る言語理解とイメージからの言語産出を可能にするシステムが視野に入ってきた。

本稿は大脳皮質の連合野のモデルを暗示している。特性地図群の垂直方向の結合は概念と象徴の長期連合を、水平方向の結合はホップフィールドモデルによる短期連合をもたらす。

概念と象徴の関係は、始まりとしては概念形成が先で、後で象徴と連合したものであろう。しかし社会性が進行することによって、言語を媒介とした概念の獲得が起こるようになる。すなわち、知覚・運動系の自己組織化によって概念獲得されていたものが、象徴の干渉によって知覚・運動系の組織化が起こるようになる。

本稿では、概念の脳内表象と象徴のそれとは別のものとした。ただし両者の連合はきわめて緊密である。言語系では音声に基づく象徴の表象が働く。先行する報告では両者を同一視していた。¹⁾ そう考えたのはミイクラインが提唱した FGREP モジュールの影響であった。FGREP モジュールは階層型ネットで構文構造を格構造に変換するものとして採用された。その学習課程は変換機能を達成するために、誤差逆伝播学習則によってシナプス結合荷重を変えていくだけでなく単語の表象そのものも変えていく方式である。学習が収束すると単語の概念の表象が獲得されているとされ、もっともらしい実験データも得られた。²⁾ このことは言語がそれだけで閉じたシステムとして完成度の高いことの証左にはなるが、

こんな考え方では依然としてシンボルグラウンディングが問題となる範囲にとどまっている。本稿では基本的に概念の獲得は知覚・運動系で行われるとしており言語系との連合のしくみも示している。したがって、先行報告において言語系だけで閉じたシステムで必要とされた格構造パイルの交差ユニットやリンクユニットは不要となる。また FGREP 機構の限界を感じさせるタイプとトークンの識別問題も解消する。

象徴には視覚によって認識される文字もあるが、本稿では音声に基づく象徴のみ考察した。われわれのことは省察すると、音の感じなるものが存在すると考えるのももっともらしく感じられる。象徴の創成は恣意的であるが、象徴の音を選択するのにも概念との連合の際にそれなりの必然性があったのかもしれない。

本稿で採用した予測学習エルマンネットは、一般化を伴う知覚・運動経験の蓄積をもたらす。これは予測能力の獲得を意味する。最近、生態学的知能の本性は予測能力であると主張される方が多い。本稿で提唱したことが支持されていると感じ心強いかぎりである。^{3) 4)}

6 結言

本稿で提唱した知覚・運動系における概念形成が、言語学の意味論の根底にあると考えられる。これを身体運動意味論と称しているが、今後これを精緻化していく必要がある。また、認知発達ロボティクスの課題はロボットブレインの構築を通して生命体の認知発達を解明することにあると考えられるが、知覚・運動系における概念形成や、群行動の社会性の中でのことばの創発など面白い課題が多い。

7 参考文献

- 1) 嶋津好生, 本木 実: コネクションスト日本語理解システムにおける文解析と文生成, 平成 13 年度九州産業大学共同研究成果報告書, pp1~16, 2002
- 2) Miikkulainen, R.: *Subsymbolic Natural Language Processing, An Integrated Model of Script, Lexicon and Memory*, A Bradford Book The MIT Press, p47~84, 1993
- 3) ジェフ・ホーキンス, サンドラ・ブレイクスリー著, 伊藤文英訳: *考える脳, 考えるコンピューター*, ランダムハウス講談社, pp99~119, 2005
- 4) 藤井直敬: *予想脳*, 岩波科学ライブラリー111, 岩波書店, pp35~56, 2005