

幼児の言語獲得における「動詞-島」段階の ニューロイダルネットによるモデル化

崎田洋一*, 中村渉**, 西野哲朗***

*松下電池工業(株), **東北大学大学院国際文化研究科, ***電気通信大学大学院電気通信学研究科
youichi8@d4.dion.ne.jp, nakamura@intcul.tohoku.ac.jp, nishino@ice.uec.ac.jp

本稿は、幼児が言語を獲得する過程の初期段階である「動詞-島」段階を、ニューロイダルネットに学習させた計算機実験について報告する。ニューロイダルネットは、状態とタイミング機構を加えたしきい値論理素子（ニューロイド）が構成するしきい値回路の一種である。具体的には、機能範疇を欠いた3語を上限とする9種類の文（自動詞文と他動詞文）を入力として与え、入力刺激の総和が一定値を超えた時点でニューロイドの状態更新を止める相関学習のアルゴリズムを適用の上、単語およびその語順を学習させた所、4周(のべ36文)の入力を与え終えた時点で、単語の意味と音声および語順の学習に成功した。

キーワード：ニューロイダルネット、しきい値回路、言語獲得、相関学習

Modeling the ‘Verb-Island’ Stage in L1 Acquisition on a Neuroidal Network

Yoichi Sakita*, Wataru Nakamura** and Tetsuro Nishino***

*Matsushita Battery Industrial Co., Ltd., **Tohoku University, and ***University of
Electro-Communication

The aim of this paper is to report on a simulation of the ‘verb-island’ stage using a neuroidal network. A neuroidal network is a threshold circuit augmented with states and a timing mechanism. We successfully constructed the network which learns utterances belonging to the ‘verb-island’ stage by exposing the network to a set of English samples which consist of intransitive and transitive clauses with no functional words/affixes.

1. はじめに

人間の脳は、一千億個以上の様々なタイプのニューロン(神経細胞)が相互に結合することで構成されている。ニューロンのモデルとしては、し

きい値論理素子がある。しきい値論理素子は、出力が0又は1となる関数 $f(x)$ によって表現される。任意のニューロンの入力は、 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 、出力は0又は1であるが、シナプス間の荷重(結合強度)は $w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)$ 、で表される。二

ニューロンに対して伝わる入力刺激は、シナプスへの入力と入力の伝達経路であるシナプス間の荷重の積の総和に相当し、一定のしきい値 (θ) を超えると、ニューロンは発火状態 (出力が 1) になり、逆にしきい値を超えない場合、そのニューロンは静止状態になる (出力が 0)。発火したニューロンは、パルス電位を発生し、このパルスは軸索上を伝搬し、シナプスの接合部を經由して、次のニューロンへ伝わる。

$$f(X) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \geq \theta \text{ のとき} \\ 0, & \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i < \theta \text{ のとき} \end{cases}$$

ニューロンを構成単位とする脳の並列分散的情報処理は、(i)可塑的である、すなわち、知識はシナプス間の荷重に依存するため変化しうる、(ii)統計的な学習を行う、すなわち、長期的知識は、シナプス間の荷重として表現され、荷重は結合するニューロンの発火頻度に依存する、のような特徴を持つ。ニューロイダルネット[1,2]もこうした特徴を持つ回路であるが、状態とタイミング機構をつけ加えたしきい値論理素子であるニューロイドから構成されており、学習機能を持つしきい値回路である。

2. ニューロイダルネット

ニューロイダルネットは、形式的には、有向グラフ G 、2つの集合 (W, X) 、および G, W, X を更新する関数 δ, λ が構成する 5 項組 $(G, W, X, \delta, \lambda)$ として定義される。この 5 項組に加えて、初期条件 IC および入力列 IS の 3 者が、この回路の動作を決定する。

ニューロイダルネット上の学習アルゴリズムは、通常、ステップ列の形式で記述される。各ステップはプロンプトおよび条件付き更新規則を記述する。プロンプトは、あるニューロイドを強制的に発火させるタイミング機構である。一方、条件付き更新規則は、2つの更新関数、モード更新関数 δ と荷重更新関数 λ を組み合わせて、 $\{...\} \Rightarrow \{...\}$ のような形式で表記する。ここで、左辺

の $\{...\}$ は、必要な条件を記述し、右辺の $\{...\}$ は、モード、すなわち、ニューロイドの状態の更新およびニューロイド間の荷重の更新を記述する。モードは、最も簡単な場合、状態 q としきい値 T の組 $[q, T]$ で表される。また、左辺の時刻を t とすると、右辺の時刻は $t+1$ に対応する。モード更新関数と荷重更新関数を適用した具体例は次の通りである。

Step 0: Prompt: 2. 4. $\{q_i=A1\} \Rightarrow \{q_i=A2, T_i=w_i, \text{ if } f_j=0 \text{ then } w_{ji}=0\}$

ここで、 q_i は、ニューロイドのあるモードを表している。頂点は発火状態か静止状態にあり、プール変数 f_i がある頂点 i が発火しているか否かを表す。具体的には、頂点 i が発火状態の場合、 $f_i=1$ 、頂点 i が静止状態の場合、 $f_i=0$ とする。辺 (i, j) は、頂点 i から頂点 j への有向辺である。最後に、上の 5 項組の W は、各辺 (i, j) の荷重 w_{ji} を表す実数の集合である。

上の更新規則を、図1(a) のニューロイダルネットに適用することによって、図1(b) のニューロイダルネットが得られる。具体的には、状態 A1 のノードの状態を A2 に更新し、しきい値を入力と対応する辺の荷重の積である刺激の総和に更新する。また、発火していなかった、すなわち、0 を出力していたノード、具体的には、ニューロイド 1 と 3 からの辺の荷重を 0 に更新する。そして、 $T_i = w_i$ によりニューロイド 5 のしきい値は 2 になる。以上の更新関数の適用の結果、ニューロイド 5 はニューロイド 2 と 4 が同時発火した場合のみ、すなわち、入力刺激の総和がしきい値 2 以上の場合にのみ発火するようになる。ここで、ニューロイド 5 は、ニューロイド 2 と 4 が表す概念の論理積を学習したとみなすことができる[2]。

3. 言語獲得に関する言語学理論

幼児の言語獲得を研究するには、様々な理論的立場がある。たとえば、生成文法は、入力データの不足にも関わらず文法を習得するとの前提の

前提に基づき、生得的な普遍文法が存在すると仮定する[3]。その前提の下に、文法の獲得は、抽象度が非常に高い核心文法に、僅かな入力に基づいて幼児が設定するパラメータの集合を加えることに帰着する[4]。しかし、この立場は、(i)核心文法の範囲はどこまでか、(ii)文法間の変異を捉えるパラメータの範囲をどう限定するか、(iii)パラメータはどのようなデータにどれだけ接することで設定されるのか、などの重要な問題を未解決のまま残している。

本稿では、ニューロイダルネットに基づく経験的・ボトムアップ的なアプローチを採用する。その中で、Michael Tomaselloは、英語を母語とする幼児の言語獲得の縦断的研究に基づいて、幼児は、句構造規則、またはその雛型であるX-bar式型、文法関係や統語範疇(たとえば、動詞、名詞など)を獲得する以前に、個々の動詞が独自の発達過程を示したことに注目した[5]。Tomaselloは、生後約1歳半から2歳の幼児の発話の中に生じる個々の動詞が、修飾句の位置・タイプや動詞が入った文の語順等の点において独自の特徴を示す事実に着目し、こうした段階の発話を「動詞-島 (verb

island)」と名付け、この段階では、幼児は動詞という一般的な文法範疇や一般的な文法範疇に依存する句構造規則を習得していないという「動詞-島仮説」を提出した。

4. 回路の全体的な構成

本稿は、幼児の文理解は文生成に先行するとの前提に基づき、「動詞-島」段階の発話に相当する自動詞文・他動詞文の単語および語順の学習を行った。まず、単語と文の語順の学習の前提条件となる初期回路が図2のように構成されていると仮定する。なお、今回の計算機実験では、機能範疇(たとえば、冠詞類、助動詞、主語と動詞の一致、名詞の単数複数の区別など)は考慮に入れない。なお、入力文としては、図2(1)のような9つの文を与える。これらの各文の意味は、動詞の意味素性のセットであるプロト動作主性質およびプロト被動作主性質によって記述される[6]。これらの素性は、動作主、経験者、受取者、被動作主のように、従来の言語理論では、意味役割(又は主題関係)の構成要素であり、図2(4)が示すように、

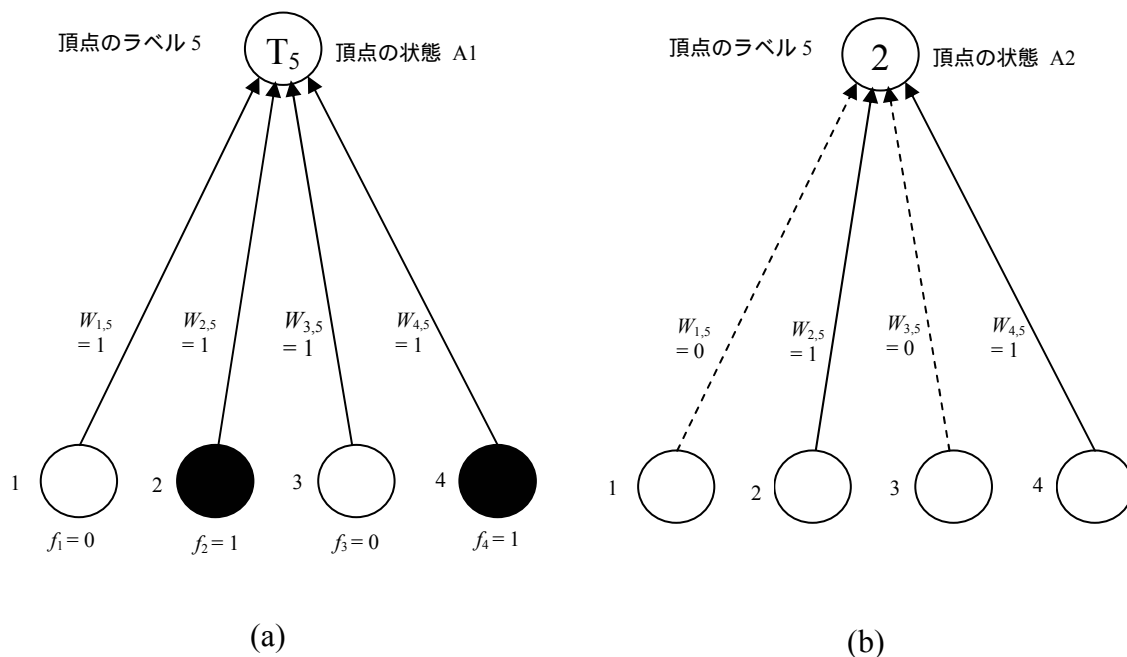


図1 ニューロイダルネットの模式図

- (1) a. Cat chase mouse.
 b. Policeman chase thief
 c. Dog bark.
 d. Girl bite apple.
 e. He bite nail.
 f. Dog bite nail.
 g. Mary walk dog.
 h. Tom walk.
 i. Tom eat cake.
- (2) プロト動作主性質(Proto-Agent Properties)
- 出来事・状態への意図的な関与
 - 感覚を持つ(sentience)又は知覚している(perception)
 - 出来事を引き起こすか、出来事の中の別の参加者の状態変化を引き起こす
 - 移動する(出来事の中の他の参加者の位置から見て)
 - 動詞が指示する出来事とは独立に存在する
- (3) プロト被動作主性質(Proto-Patient Properties)
- 状態変化を経験する
 - 漸増的テーマ(incremental theme)の役割を果たす
 - 出来事の中の別の参加者から因果的な影響を受ける
 - 静止している(出来事の中の他の参加者の位置から見て)
 - 動詞が指示する出来事とは独立に存在しない
- (4) 項選択原理(Argument Selection Principle)
- 主語と目的語を持つ述語において、その述語がプロト動作主性質をより多く与える項が主語として語彙化され、その述語がより多くプロト被動作主性質を与える語が目的語として語彙化される。

図 2. 入力文の例とその特性記述

習アルゴリズムが作動し、単語の意味素性の獲得と単語の発音の獲得が並行して進められる。以下、図 2 に示した 8 つの層をより詳細に説明する。

まず、素性入力部は、入力された単語の素性の有無を正負(±)の 2 値で表す。意味素性は、図 3 のプロト動作主性質とプロト被動作主性質、7 種類に加えて、±human、±animal、±thing、±action、±state の 5 つの素性を加えて計 12 種類の素性を用意する。プロト動作主性質とプロト被動作主性質を 7 つにまとめたのは、相反

他動詞文の主語と直接目的語の選択を決定する。

5. 単語の意味と音声および語順獲得のモデル化

5.1 各層の動作

初期回路は、図 3 に示すように、素性入力部、素性獲得部、素性内容のコピー部、素性の順序獲得部、音素入力部、音素獲得部、音素内容のコピー部、および音素の順序を獲得する順序獲得部の 8 つの処理部門から構成されている。この初期回路に入力が与えられることによって、後述する学

するふたつの性質に対してひとつの素性で±の割り当てをするからである。ひとつの素性につき、値が正の場合に発火するニューロイドと値が負の場合に発火するニューロイドを用意したので、24 個のニューロイドから構成されている。

素性獲得部は、素性入力部で与えられた素性を獲得する。素性はニューロイドの発火パターンが表現する。ニューロイドは 48 個用意し、初期しきい値は無限大である。48 個のニューロイドは、6. で述べるように更新関数を確率的に適用するため、12 ブロック(1 ブロックあたり 4 個のニュー

ーロイド)に分けられる。素性獲得部の発火パターンは、隣接する層にコピーされ、一時的に保持される。時刻 t に素性獲得部で出力される発火パターンは、時刻 $t+1$ の時、素性内容のコピー部で、同一のパターンで発火する。このコピー部のニューロイド 48 個のしきい値は 1 である。

素性の順序獲得部は、入力された意味素性の順序を獲得する。素性獲得部の発火パターンと素性内容のコピー部の発火パターンに基づいて、単語の順序を学習する。ニューロイドは、初期のしきい値が無限大である 48 個を用意し、素性獲得部と同様に、12 のブロックに分ける。素性内容のコピー部の発火パターンは、1 ステップ前に入力された単語の発火パターンなので、1 ステップ前の発火パターンと現在の素性獲得部の発火パターンが学習されたものと同じ場合にのみ、順序獲得部の発火パターンが学習された順序獲得部の発火パターンに一致するように学習させる。このことから、素性の順序獲得部は、実際に単語の順序を学習していると考えられる。

同様に、音素入力部では、実験に用いた 17 種類の単語を 5 ビットの 2 進列で表現した。音素獲得部は、単語の構成要素である音素の連鎖を獲得する部分である。ニューロイドは 32 個用意し、初期のしきい値は無限大である。32 個のニューロイドは、更新関数を確率的に適用するために、8 つのブロック (1 ブロックあたり 4 個のニューロイド)に分かれている。最後に、音素の順序獲得部では、音素獲得部の発火パターンと 1 ステッ

プ前の音素の発火パターンに相当するコピー部の発火パターンに基づいて学習を進める。ニューロイドは 12 ブロックに分けて 48 個用意し、初期のしきい値は無限大である。

5.2 結線

初期結線の張り方を説明する。数字は図 2 の中のものに対応している。結線 1 は、素性入力部から素性獲得部へ結ばれた辺である。各素性の \pm のどちらかのニューロイドと素性獲得部のニューロイドが辺で結ばれている。辺の荷重は 0 から 5 のランダムな整数値を取る。結線 2 は、素性獲得部から素性内容のコピーに結ばれた辺であり、対応するニューロイドとの間を荷重 1 で結んでいる。結線 3 は、素性獲得部から素性の順序獲得部へ辺を結んでいる。各ニューロイドが結ばれている確率は 1/2 であり、辺の荷重は 0 から 5 のランダムな整数値を取る。結線 4 は、素性内容のコピー部から順序獲得部を結んでいる。辺の荷重は、結線 3 と同様である。

結線 5 は、音素入力部から音素獲得部まで結ばれた辺である。音素入力部の 2 進値(0, 1)のどちらかのニューロイドから音素獲得部のニューロイドに辺が結ばれている。各辺の荷重は 0 から 5 のランダムな整数値を取る。結線 6 は、音素獲得部から音素内容のコピー部に結ばれた辺であり、対応するニューロイド間に発火パターンをコピーできるように、荷重 1 で結んでいる。結線 7 は、音素獲得部から順序獲得部まで結んでいる。

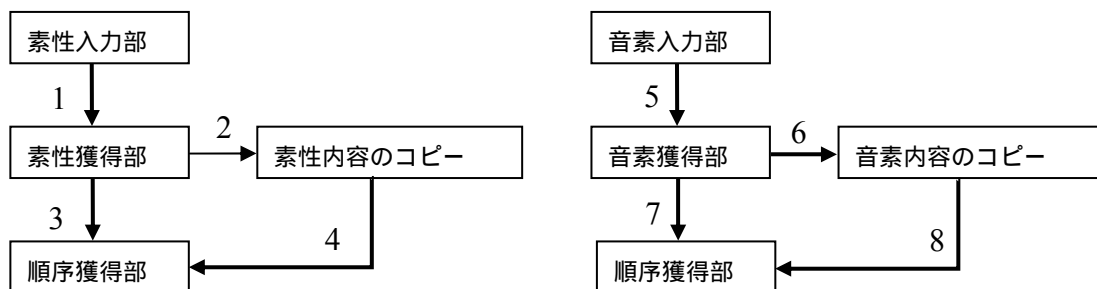


図 3 ネットワークの構成

各ニューロイドが結ばれている確率は1/2であり、辺の荷重は、0から5のランダムな整数値を取る。最後に、結線8は、音素内容のコピー部から順序獲得部を結んでいる。辺の結び方・荷重は結線7と同様である。

6. 学習アルゴリズム

学習方法は、まず、素性獲得部のニューロイドにのみ確率的な学習アルゴリズムを適用し、それらのニューロイドが学習を一通り終えた後に、順序獲得部に学習アルゴリズムを適用した。この学習手順は、文の習得に単語の習得が先行するという実際の幼児の言語獲得の過程を踏まえている。

6.1 素性獲得部・順序獲得部の学習アルゴリズム

入力の前側の荷重の総和が50以下の場合、素性獲得部のニューロイドに対して、もし前の層のニューロイドが発火し、且つ辺の荷重が10以下の場合、対応する辺の荷重を3増やす。もし前の層のニューロイドが発火しなくて辺の荷重が0以上の時は、対応する辺の荷重を1減らす。一方、入力の前側の荷重の総和が50以上になったら、状態をum(更新が不可能な状態)に変更し、このニューロイドは学習を終えたものとして、これ以上の更新はできないようにする。以上の学習プロセスは次のように記述できる。

(i) 辺の荷重が50未満の場合

$$\{q_i=cc^*, w_i < 50\} \Rightarrow$$

$$\{\text{if } f_j=1 \ \& \ w_{ji} < 10 \ \text{then } w_{ji}:=w_{ji}+3,$$

$$\text{if } f_j=0 \ \& \ w_{ji} > 0 \ \text{then } w_{ji}:=w_{ji}-1,\};$$

(ii) 辺の荷重が50以上の場合

$$\{q_i=cc^*, w_i \geq 50\} \Rightarrow$$

$$\{q_i=um, \text{ if } f_j=1 \ \& \ w_{ji} < 10 \ \text{then } w_{ji}:=w_{ji}+3,$$

$$\text{if } f_j=0 \ \& \ w_{ji} > 0 \ \text{then } w_{ji}:=w_{ji}-1,\};$$

状態のccの後に*が付いているが、ここにはニューロイドのブロック番号1-12の中のどれかが入る。また、上のアルゴリズムは、ニューロイド4個の作るブロック毎に1/2の確率で適用される。

素性獲得部でその部分の発火パターンがある

程度特定され始めてから、同じ学習アルゴリズムを、素性の順序獲得に適用する。素性獲得部に適用される上のアルゴリズムとの相違は、ニューロイドへの辺の荷重の総和が100以上になった段階で、辺の荷重の更新を止める点および学習アルゴリズムが確率的な適用を受けない点の2点である。

6.2 音素獲得部・順序獲得部の学習アルゴリズム

音素獲得部と音素の順序獲得部の学習アルゴリズムも、意味素性の学習の場合と同様に、前もって音素獲得部のニューロイドを学習させてから、すなわち音韻辞書を獲得してから、順序獲得部へ適用する。なお、音素獲得部の学習は、意味素性の獲得と同様、確率的に適用される。素性獲得部へ適用されるアルゴリズムとの相違は、ニューロイドへの辺の荷重の総和が25になった段階で更新を止める点である。なお、音素の順序獲得部へ適用される学習アルゴリズムは、素性の順序獲得部に適用されるものと、ニューロイドへの辺の荷重が30以上になったら更新を停止する点を除けば同一である。

7. 実験

実験では、図2の入力文(1a)-(1i)をこの順序で入力していく。一通り入力が終わったら、再び文(2a)から順々に入力する。本稿では、(1a)-(1i)まで入力し終えたことを「入力文を1周する」と記述する。なお、6.で提示した学習アルゴリズムは単語の入力があるたびに適用される。

実験において、入力文の2周目が終わる時には、殆どの素性獲得部と音素獲得部のニューロイドがumになっていた。それ以降、3周目から素性獲得部と順序獲得部の結線および音素獲得部とその順序獲得部の結線にも学習アルゴリズムの適用を始めた所、4周目が終わった時に、順序獲得部のニューロイドもumという結果になった。

8. 評価とまとめ

今回の実験で構成したニューロイダルネットワークの評価を行った。図3は、単純再帰ネットワーク[7]に類似しているが、隠れ層→文脈層→隠れ層という閉路を持たない点で、エルマン・ネットとは異なり、学習アルゴリズムも、エルマン・ネットで用いられている誤差逆伝播法ではなく、大脳皮質の学習形態により近い相関学習である。また、学習速度が非常に速く、生後約1歳半から2歳という動詞-島段階において、幼児が発話し、理解できる図2の文の集合(1a)-(1i)を4周入力しただけで単語の意味素性・発音の発火パターンと単語の順序学習をすることができた。

今後の課題としては、本稿では考慮に入れなかった受身文、複他動詞文などの構文や機能範疇の習得を挙げることができるが、こうしたより高度な文法を、幼児の言語獲得過程を再現しつつ獲得するには、回路の形状や学習アルゴリズムの見直しも行う必要があるだろう。

謝辞 本研究の実施に当たって筆者の所属研究室の諸氏から有益なコメントとご協力を頂きました。なお、本稿作成の際に、東北大学大学院国際文化研究科博士課程の茂木和洋氏、電気通信大学大学院電気通信学研究科博士課程の大久保誠也氏に大変お世話になりました。感謝します。

参考文献

- [1] Leslie G. Valiant. *Circuits of the Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [2] 西野哲朗 『中国人郵便配達問題 = コンピューターサイエンス最大の難関』講談社 1999
- [3] E.M. Gold. Language identification in the limit. *Information and Control* 10, 447-474, 1967.
- [4] Maria Teresa Guasti. *Language Acquisition*. Cambridge, MA.: The MIT Press, 2002.
- [5] Michael Tomasello. *First Verbs*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [6] David Dowty. Thematic proto-roles and argument selection. *Language* 67, 547-619, 1991.

- [7] Jeffrey L. Elman. Finding structure in time. *Cognitive Science* 14, 179-211, 1990.