

論文の内容の要旨

論文題目 A Dynamical Systems Approach for Learning Situated Combinatorial Semantics
(ロボットの行動経験に基づく組み合わせ的な意味表現の学習モデル)

氏名 杉田 祐也

1. 導入

人間の認知的能力の複雑さの説明に、要素概念の組み合わせ、という考え方を欠かすことができない。たとえば、文の意味が単語の意味の組み合わせとして理解できるとする「意味の合成性の原理」という考え方がある。これによって、無限個の異なる文章を理解・生成する人間の認知的能力は、有限個の要素の無限通りの組み合わせとして理解できる。

本論文は、組み合わせ的な心的表示を実世界の対象に接地させることが、Harnad が提唱する記号接地問題よりも本質的に困難な問題であることを指摘する。つまり、記号と実世界の対象の対応関係を獲得できたとしても、記号の組み合わせと実世界の対象の組み合わせの対応関係を自動的に獲得できない。たとえば、「赤いブロック」という言葉に対応する対象を、「赤い」と「ブロック」のそれぞれに対応する対象の組み合わせとして合成し理解するシステムを構成することは、見かけほど単純ではない。従来のモデルは、「『赤い』は《物体》の《色》である」、「『ブロック』は《物体》であり属性として《色》をもつ」といった明示的な組み合わせのルールを用いる。したがって、《色》や《対象》といった要素概念を設計者が与え、それらがタスクに接地した意味をもつことを設計者が保証しなくてはならない。そのために、実世界の対象を要素に分解するアприオリな手続きなど、様々なプログラミングが要求される。このように、意味要素への還元に基づいたモデルでは、多くのタスク依存の概念やそれらの組み合わせ方についての手作業による実装を必要とする。また、認知言語学における意味の合成性についての議論に代表される、単語と文の意味の関係についての認知的な解釈の困難をそのまま受け継ぐことにもなる。

具体的には、力学系人工神経回路網の示す汎化能力を利用したタスクに接地した組み合わせ的・心的表示を学習するモデルを提案し、これらの問題の新しい解決法を議論する。このモデルを用いてロボットが単純な文と行動パターンの対応関係を学習する実験を行った。その結果、ロボットがいくつかの文と行動パターンの対応関係を学習することで、文法や品詞、意味要素に関する知識を一切外部から与えずに、未知の文を類推的に理解し正しい行動パターンを生成することができた。このときにモデルに自己組織化された構造を解析した結果から、組み合わせ的・心的汎化を実現する力学的な構造について議論する。また、組み合わせ論的な複雑さをシンボルの組み合わせに還元せずに、アナログ的なシステムの示す汎化能力として捉える方法論について検討する。

2. 実験タスク

実験タスクは学習フェーズとテストフェーズから成る。学習フェーズにおいて、ロボットが動詞と名詞から成る2単語文と、環境中に置かれた物体を操作する行動パターンとの対応を教示データから学習する(図1, 2)。言語セットは、あらかじめ定義された3つの動詞と6つの名詞の組み合わせからなる18種類の文を含む。9種類の行動カテゴリの教示は、実験者がジョイスティックでロボットを操作して作成した行動に伴うセンサモータ情報の時系列を用いて行なった。ロバストな行動学習をするために、各カテゴリについて10種類の異なる行動パターンを作成した。文は単語の長さ3の時系列(文の開始シンボルを含む)、行動はセンサモータイメージの長さ15から90程度の時系列として与えた。このうち14の文章について行動パターンとの対応関係を学習した後に、残りの4つの文から対応する行動を生成できることをテストした。

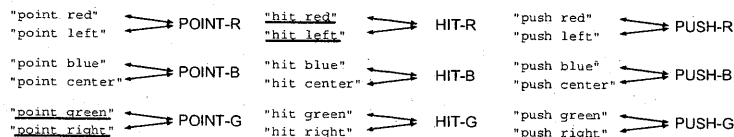


図1: 教示する文と行動パターンの関係。4つの文(下線)を教示データから外す。

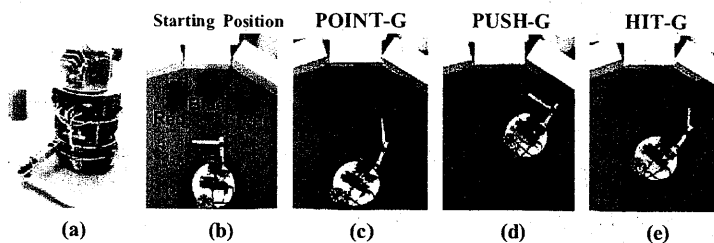


図2: モバイルロボット(a)が、3つの色付き物体が配置された環境で固定の初期位置(b)から、各物体に対し3種類の異なる動作をする(c-e)。

3. 学習モデル

学習モデルは、2つのパラメタバイアスノード付き再起型神経回路網 (RNNPB) と呼ばれる人工神経回路網から成る。それぞれの回路網が言語モジュールと行動モジュールとして動作し、相互作用しながら文と行動パターンの汎化的な連合学習をする。谷らによって提案された RNNPB のアーキテクチャは、ジョルダン型の再起型神経回路網 (RNN) の入力層にパラメタバイアス (PB) ノードと呼ばれる回路網のダイナミクスを変化させるためのノードを付加したものである (図3 の各モジュール)。PB ノードの値は通常のノードの値と異なり、時系列の生成の最初に固定値が与えられ、その後、変化しない。時系列の生成の最初に与える PB ノードの値を変えることで生成する時系列をコントロールできることを利用して、時系列と時間的に変化しない PB ノードの値との対応関係を学習することができる。

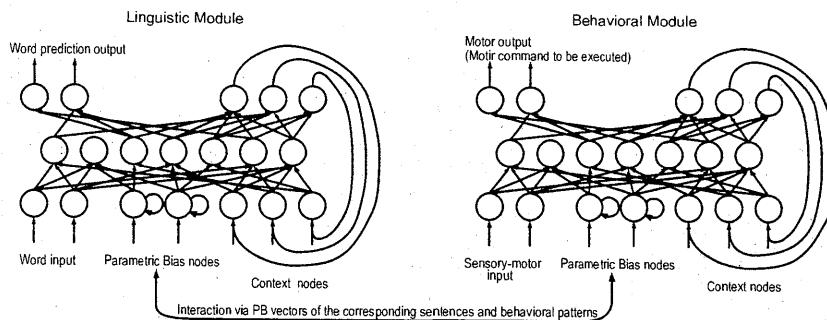


図3: 提案する学習モデルは2つRNNPB から成り、それらがPB ノードを介して双方向に結合している。PB ノードは自己ループを持ち、時系列の生成の最初にこのノードに与えられた値が生成終了まで保持される。

2つのRNNPB は、PB ノードを通じて相互作用しながら同時に学習する。言語モジュールは与えられた複数の文の学習を通じて、各文に対応するPB ノードの値を自己組織化学習する。同時に、行動モジュールも教示データに含まれる各センサモータ時系列に対応するPB ノードの値を自己組織化する。それぞれの学習と並行して、対応する文とセンサモータ時系列の各PB 値がなるべく等しい値となるように互いのPB 値を近づけ合うことで、対応関係を学習する。学習後に、文を認識し行動を生成する場合には、まず、言語モジュールが与えられた文に対応するPB 値を計算する。この逆計算は、学習後の言語モジュールのネットワークが、与えられた文をもっとも小さい誤差で再現することができるPB 値を求める最適化計算として実現できる。この文をエンコードしているPB 値を行動モジュールに与えることで、ロボットが文に対応する行動を生成できる。

4. 言語と行動の共有構造の自己組織化学習

学習の結果、言語モジュールが教示データに含まれている文だけでなく、未学習の文も認識できた。言い換えると、未学習の文を生成することができるPB 値が存在するということである。さらに、このPB 値を行動モジュールに与えることによって、対応関係を学習していないに関わらず、ロボットが対応する行動を生成できた。つまり、文と行動の関係の汎化が実現できた。

この汎化が両モジュールそれぞれのPB値の空間に自己組織化された共通の構造によって実現されていることが解析によって明らかになった(図4)。ここで重要なのは、学習時に課された制約条件は、対応する個々の文と行動パターンのペアについての制約であったのにも関わらず、制約が存在しなかった未学習の文についても対応関係が獲得できたことである。したがって、個々のペアのPB値間の相互作用から、PB空間の構造全体に渡る相互作用が発生したといえる。

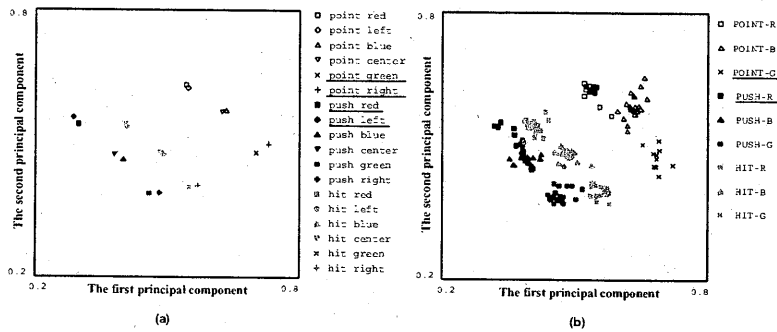


図4: 言語 (a)、行動 (b) の各モジュールの6次元のPB空間を主成分解析を用いて2次元に射影した。未学習の文(下線付きの文)を含めた全ての文について、正しい行動パターンとの対応関係が学習できていることが確認できる。

この個々の対応の制約が全体的な対応の組織化に至る過程には、各モジュール内での教示データの汎化的な学習が関与している。各モジュールは、単に文や行動パターンの時系列を暗記的に学習するのではなく、複数の文の間や、複数の行動パターンの間をPB空間の構造として自己組織化しながら、汎化的な学習をする。言語モジュールは文法構造を反映した内部構造を獲得し、また、行動モジュールは行動パターンの類似性に基づいたカテゴリー的な内部構造を獲得する。この各モジュール内の構造を保持しようとする傾向によって、個々の文と行動パターンとの間の制約によって生じるPB値の変化が構造全体に波及する。

5. まとめ

これらの結果から、我々のモデルにおいて、単語の意味が単独で存在しておらず、それを含む全ての文の意味に依存していると結論できる。また、単語と組み合わせ規則のそれぞれの文の意味への寄与を分離する境界がはっきりしない場合でも、組み合わせ論的な文の理解が可能であることを示した。我々の実験は、追加学習のない2単語の文だけの非常に限られた系で行われているが、必要最低限の組み合わせ的な構造について、全体論的な実現法と解釈を、実験の結果から具体的に示している点で、意味の合成性の原理に関する問題を含む様々な認知現象の理解を深めるのに有効であると考えられる。今後の課題として、より大きな言語セットを用いた実験だけでなく、認知科学の記号的な説明的概念と、力学系モデルが示すダイナミクスのもつ性質の関係について議論を深めていきたい。特に、単語の意味を汎化に付随した仮想的なものを見なす我々の解釈と、カテゴリー化によって得られた概念と見なす認知言語学の解釈の関係について考察する必要がある。