

協調タスクによる記号的コミュニケーションシステムの 創発シミュレーション

○河野圭祐 森裕紀 浅田稔 (大阪大学大学院工学研究科)

1. はじめに

言語を扱うシステムがどのように形成されたものなのか、また、言語自体がどのようにして進化したものであるのかといった問題は、未だに謎の多い問題である。歴史的に見れば、言語とそれを扱うシステムはともにコミュニケーションが必要となる環境の中で、単純な構造から徐々に複雑な構造へと進化していったものと考えられる。しかし、言語進化は、実証的な証拠を得ることは非常に困難である。このような問題に対しては、構成論的なアプローチが有効である [1]。つまり、推定したシステムを、シミュレーションやロボットなどによって実際に作成し、動かしてみることによって、シンボルの創発を確認することが重要である。また、言語がいかんして創発されたものであるのかという問いを解決することは、どのように言語が進化したかという歴史的な問題だけでなく、実環境で動作するロボットが、いかんして言語を獲得することができるのかという問題へのアプローチでもある。

本論文では、シミュレーションにおいて協調タスクの達成を目指す中で、単純なアーキテクチャから、いかんしてコミュニケーションが創発するのかという問題にアプローチする。言語のうち、比較的初期に起こったと考えられるシンボルも、同時に本シミュレーションにおいて創発される。シミュレーションにおいて、実際にシンボルおよびコミュニケーションを創発させることによって、これらの創発に必要なアーキテクチャおよび環境への示唆を得ることができる。

2. 言語創発の構成的研究

構成論的なアプローチによる言語創発のシミュレーションモデルとして、Kirby らは、世代交代を繰り返すエージェント間で、交わされる言語が徐々に構造化されることを示した [2]。このシミュレーションでは、世代交代を繰り返すエージェント集団において、何世代にも渡る言語のやり取りと、エージェントの持つ言語の構造化に寄与する三つのルールによって、言語が構造化される。この構造化は、一種の自然選択として見ることができ、多数のエージェントとそのルールという環境の中で最適な言語構造が生き残ったといえる。このシミュレーションでは社会的な相互作用によって言語を構造化させることに成功しているが、エージェントのもつ三つのルールは明に言語の構造化を促すものであった。

実環境においてロボットを用いて言語獲得にアプローチしている研究として、Steels は Language Game という枠組みを提唱している [3]。Language Game では、言語的なやり取りを単純化したゲームを達成できるエージェントの作成によって、実環境においてロボットが

言語獲得する際に必要な機能を開発することができるとしている。

また、人間同士のインタラクションの観察から言語創発にアプローチしている研究もある。金野らは、コミュニケーションシステムがインタラクションの中から起こる過程およびメカニズムを解明するための実験を行なっている [4]。この実験では、被験者は三角形や四角形といった記号を用いたコミュニケーションのみによって、ある協調課題を解くことを求められる。彼らはこの実験において、はじめは記号の使い方についてのルールを持たない被験者達が、協調課題を解くために新しいコミュニケーションシステムを創発させることを示した。しかし、この実験は被験者がもともと持っていた自然言語が、新しいコミュニケーションシステムの創発に大きな影響を与えたと考えられる。

また、Morita らは金野らの実験のシミュレーションモデルを提案した [5]。このシミュレーションにおいて、エージェントは金野らの実験と同様に新しい記号コミュニケーションシステムの創発に成功した。しかし、このモデルは、人間の多くの認知機能を参考に作られた ACT-R というシステムによって実装されている。タスクを達成するために十分すぎる能力を、はじめから与えられているため、このシミュレーションから、コミュニケーションの創発に最低限必要なアーキテクチャを知ることは困難である。

3. 目的

本研究では、シミュレーションにおいて、単純なアーキテクチャによって実装された2体のエージェントが、与えられた協調タスクの達成を目指す中で、連続した信号の中から、離散的な記号を取り出し、それを用いてコミュニケーションシステムを形成することを示す。シミュレーションで用いる協調タスクは、金野らの実験 [4] を参考にして設定した。

金野らの実験では被験者がコミュニケーションシステムを創発させることに成功しているが、はじめから言語を取得している被験者の実験であったので、コミュニケーションシステムの創発に必要な最小のアーキテクチャに関する理解を得ることは難しい。本シミュレーションでは、はじめは全くコミュニケーションシステムを持たないエージェント間で、連続的な信号から離散的な記号が抽出され、その記号を用いたコミュニケーションシステムが創発することを示す。これによって、シンボルおよびコミュニケーションの創発に必要なアーキテクチャ、環境への示唆を得ることができる。

4. シンボルの創発シミュレーション

4.1 協調性タスク

本シミュレーションのタスクについて説明する。このタスクは2体のエージェントと4マスのフィールドによって行われる。図1に概略図を示す。このタスクの目的は2体のエージェントが同じマスに移動することである。シミュレーションタスクについて以下に説明する。

1. エージェントは4マスのフィールドのうちのどこかに、ランダムに配置される。このとき、エージェントはともに自分の位置はわかるが、相手の位置はわからない。
2. エージェントは互いに1回ずつ -1以上1以下の実数で構成される信号を送る。この信号の交換は非同時で、片方のエージェントは相手の信号を見てから信号を決めることができる。また、信号は正規分布に従うノイズが加えられた後、相手のエージェントへ伝わる。
3. エージェントは同時に移動方向を決定する。移動できるのは、現在位置の上下のマスの、左右のマスの、現在のマスのいずれかで、対角線上にある部屋には移動することができない。
4. ここまでを1試行とする。手順1に戻る。

このゲームを達成するためには、信号によって新しいコミュニケーションシステムを構成することが必要である。

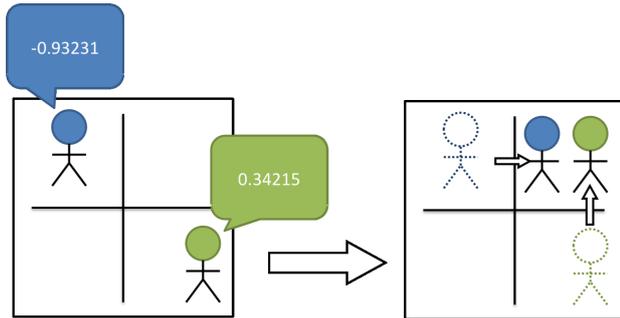


図1 タスク概略図。エージェントは4マスのフィールドの中で、1回ずつの信号の交換によって同じ位置に移動することを目指す。

4.2 エージェントの実装

本シミュレーションにおいて、それぞれのエージェントは、記憶を持つ一般的な学習アーキテクチャである Elman 型のニューラルネットワーク [6] として実装された。教師信号は強化学習の枠組みで与えられる。図2にエージェントのネットワークを示す。また、先に信号を送るエージェントを固定し、これを agent0 とした。また、信号を受け取ってから信号を送るエージェントを agent1 とした。

ネットワークの入力は自身の位置 [2 ノード] と相手からの信号 [1 ノード](agent0 は相手からの信号はないので常に 0) である。また、ネットワークの出力は相手への信号 [1 ノード] と移動方向 [5 ノード] とした。出力のうち、移動方向は5つのノードそれぞれに、上、下、

左、右、その場にとどまるの移動方向を割り当て、最大値をとったノードを移動方向として選択するものとした。agent0 は自分の発した信号を考慮して移動方向を決める必要があるため、エージェントはリカレントネットワークの一種である Elman 型のニューラルネットワークによって実装された。エージェントは互いに対称に実装されるべきであるので、今回のタスクを解く上では必要ないが、agent1 も Elman 型のニューラルネットワークで実装した。また、ネットワークの中間層は 40 ノードである。

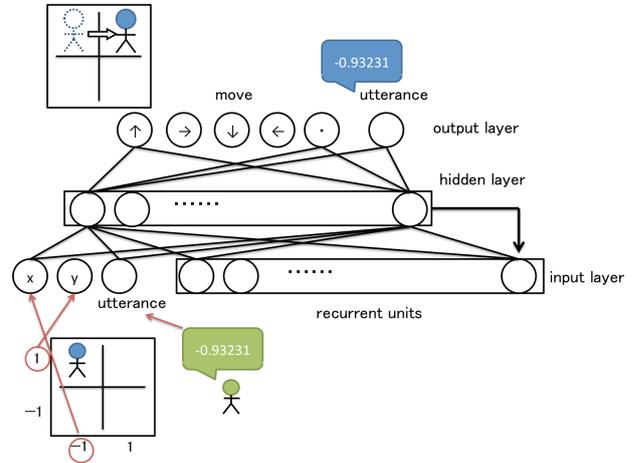


図2 エージェントのネットワーク。位置および相手からの信号を入力として、移動方向および相手への信号を出力する ElmanNetwork。

エージェントは1試行が終わるごとに学習を行う。学習は強化学習的に生成した教師信号をバックプロパゲーションすることによって行われる。教師信号の生成は [7] を参考に生成式を設計した。以下の式 (1) から (5) によって、教師信号は生成される。エージェントの発する信号の教師信号と移動方向の教師信号とで生成の方法が異なる。これは、信号が -1 から 1 の連続的な値を取るのに対して、移動方向は -1 or 1 のどちらかの値に収束する必要があるからである。

- 信号の教師信号生成式

1. タスクが達成されたとき

$$\begin{aligned} \text{InstructionSignal} \\ = F((1 - \alpha)\text{NetworkOutput} + \alpha X_r) \end{aligned} \quad (1)$$

2. タスクが失敗したとき

$$\text{InstructionSignal} = F(\text{NetworkOutput} + \delta) \quad (2)$$

α は定数、 $F(x)$ は出力を -1 から 1 に変換する関数である。タスクが達成された時、エージェントのネットワークはそのときに出力した信号を教師信号にする。タスクが失敗した時、エージェントのネットワークはそのときの出力にランダム値 δ を足したものを教師信号にする。

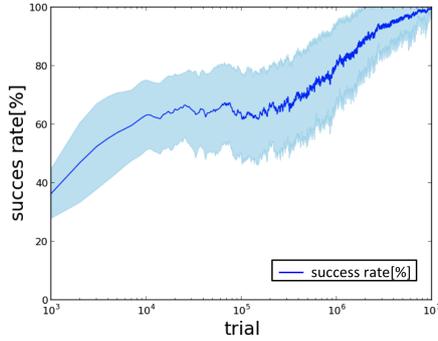


図3 タスク達成率の遷移。初め25%程度の達成率がほぼ100%になっていることがわかる。

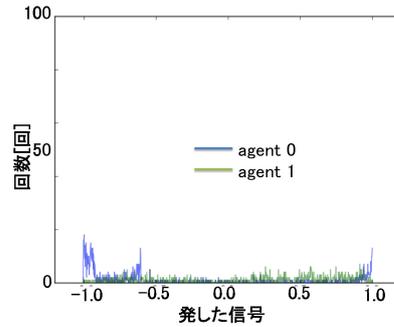


図4 エージェントが最初の1000試行で発していた信号の分布。一様な分布になっている。

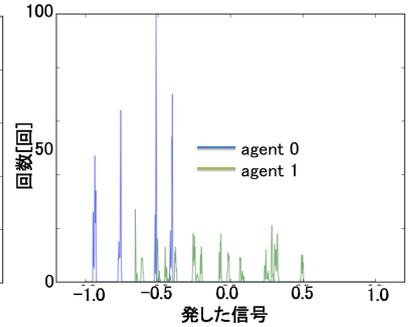


図5 エージェントが最後の1000試行で発していた信号の分布。いくつかの特定の値だけをとっていることがわかる。

- 移動方向の教師信号生成式
教師信号はそれぞれのノードについて計算される。
 i 番目のノードの教師信号は以下の様になる。

$$X_i = \left(\frac{2}{1 + \exp(-NetworkOutput_i)} - 1.0 \right) \quad (3)$$

$$X_{di} = (1 - X_i)(1 + X_i) \quad (4)$$

$$InstructionSignal_i = X_i + \gamma reward X_{di} X_{ri} \quad (5)$$

γ は定数。 X_d は安定的に出力を生成するために加えられる項である。 X_r は、エージェントが実際に移動方向として選択した成分のみ1, その他は-1のベクトルである。例えば、エージェントが移動方向として”右”を選択した場合、 X_r は (-1 1 -1 -1) となる。

5. 結果

100万試行からなるシミュレーションを100回行い、タスク達成率の平均値および標準偏差を求めた。シミュレーション中のタスク達成率の変化を図3に示す。達成率の値は1000試行の平均値である。シミュレーション開始時のタスク達成率は25%程度であるが、シミュレーションが進むにつれて上昇し、シミュレーション終了時にはほぼ100%になった。タスクの達成にはコミュニケーションシステムの創発が必要であるので、新しいコミュニケーションシステムがエージェント間で創発されたと考えられる。

また、図4は、ある1回のシミュレーションにおいて、シミュレーション開始時1000試行でエージェントが発した信号の分布を示している。信号の分布は-1から1の領域を1000分割し、そこに含まれる信号を発した回数を数えることによって求めた。シミュレーション開始時には、エージェントが発する信号はばらばらで、一様に様々な値を用いていることがわかる。同様に図5にシミュレーション終了直前の1000試行でエージェントが発した信号の分布を示す。終了時にはエージェントはある特定の信号のみを用いて、やり取りを行なっていることがわかる。これは連続値を取り得る信号から、離散的な記号が創発されたことを意味している。離散的な記号が創発された原因として、ノイズ

に対するロバスト性の向上が挙げられるが、信号にノイズを加えなかった場合にも同様に信号の離散化が見られたことから、別の原因も存在していたと考えられる。他の原因として、タスクの環境自体が4マスという離散的なものであったことが挙げられる。

エージェントが信号によって、何の情報をやり取りしていたのかを知るために、エージェントの信号とエージェントの位置、選択した移動方向、移動先の相互情報量を計算した。ここで相互情報量は2つの確率変数が共有している情報量を示している。例えば、エージェントの信号と位置の相互情報量は、その信号を知った時にどの程度の位置情報を知ることができるかを表している。つまり、信号の意味を考える立場では、この相互情報量は信号がどの程度、位置を意味しているのかを表しているといえる。

図6にagent0(先に信号を出すエージェント)の信号と位置の相互情報量を示す。シミュレーション終了時にはこの値がほぼ2bitsになっていた。エージェントが取り得る位置は4マスのいずれかであり、その情報量は2bitsである。よって、このエージェントが信号によって自分の位置の情報を完全に伝えているといえる。また、図5から、このエージェントがシミュレーション終了時に発していた信号は4つに離散化されていることがわかる。それゆえに、これらの4つの信号がそれぞれの位置を示していると考えられる。

同様に図7に、エージェントの発した信号と相手のエージェントの移動方向の相互情報量、およびエージェントの発した信号と相手のエージェントの移動先の相互情報量を示す。agent1が発した信号に対するagent0の移動の相互情報量の値が、agent0が発した信号に対するagent1の移動の相互情報量の値よりも高くなっていることがわかる。これは、agent0がagent1から与えられた信号に従っているということの意味しており、これはエージェント間に指示役とそれに従う役という役割分担が生じていることを示している。このような関係は金野らの実験[4]においてもみられたものである。

また、図8にエージェントの発した信号間の相互情報量を示す。この値はシミュレーション開始時には非常に高い値をとっており、これは、agent1がagent0の発した信号に一つ一つ対応した信号を返していることを

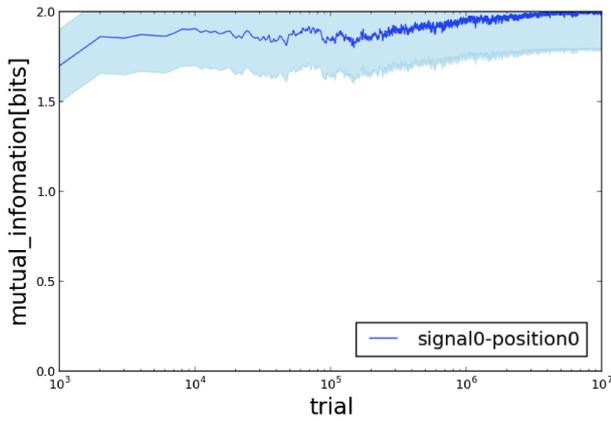


図6 agent0の位置と信号の相互情報量。値が約2bitsになっていることから、位置を完全に伝えていることがわかる。

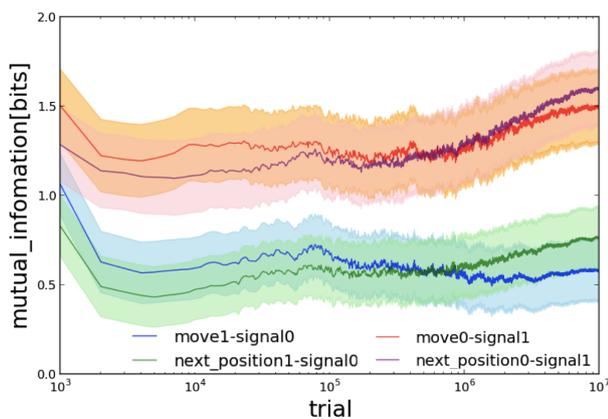


図7 エージェントの信号と、それを受け取ったエージェントの移動方向、および移動先の相互情報量。agent1がagent0に指示を与えるような役割分担が生じていることを示している。

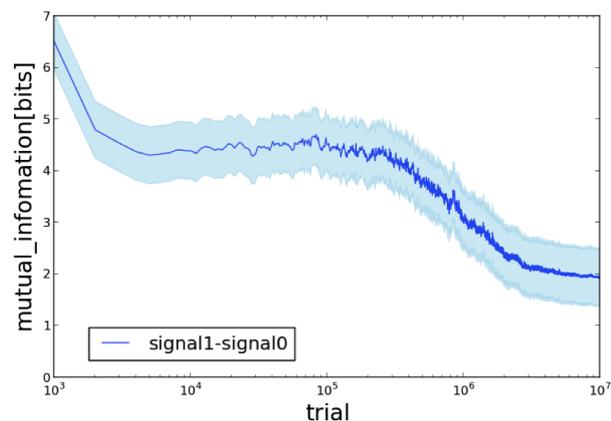


図8 エージェントの信号間の相互情報量。値が徐々に低くなっていることから、一対一対応の信号を返すのではなく、必要な情報のみを伝えるように戦略を変更していることがわかる。

示している。この値がシミュレーション終了時には小さくなっていることから、agent1がagent0の発した信号に対して、必要な情報のみを返すように戦略を変更していることが読み取れる。

6. おわりに

本論文では、シミュレーションにおいて、単純なアーキテクチャのみを持つエージェントが協調性タスクの達成を目指すことによって、シンボルを創発することを示した。また、創発されたシンボルを用いたコミュニケーションシステムも創発された。形成されたコミュニケーションシステムにおいて、エージェントが発していた信号を見てみると、エージェントは連続値を取りうる信号から特定の値だけを選択することによって記号を創発し、その記号を用いてコミュニケーションシステムを形成していた。相互情報量による分析によって、エージェントが発していた信号の意味を分析したところ、エージェント間には、タスク達成のために必要な役割分担が生じていることがわかった。これらによって、今回のようにコミュニケーションを取ることによって協調しなければ解決できない課題と、強化学習を行える単純なアーキテクチャを持っていれば、離散的な記号の創発、およびそれを用いたコミュニケーションシステムを創発できることがわかった。

しかし、今回のシミュレーションでは、複雑な文法や共通の語彙などの創発は見られなかった。今後の課題として、共通の語彙の創発を目指した、複数のエージェント間で行われるタスクの実装や文法の創発、より単純なアーキテクチャおよび複雑な環境を用いたシミュレーションが挙げられる。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金特別推進領域研究「神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学」(No.24000012)の助成を受けた。

参考文献

- [1] 橋本敬. 言語進化とはどのような問題か? 構成的な立場から. 第18回人工知能学会全国大会論文集, 1CS-2, 2004.
- [2] S. Kirby. Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax. *Linguistic evolution through language acquisition: Formal and computational models*, pp. 173-203, 2002.
- [3] L. Steels. Language games for autonomous robots. *Intelligent Systems, IEEE*, Vol. 16, No. 5, pp. 16-22, 2001.
- [4] 金野武司, 森田純哉, 橋本敬. 調整課題における記号コミュニケーションシステムの形成実験. 信学技報, NLC2010-39, pp. 49-54, 2011.
- [5] J. Morita, T. Konno, and T. Hashimoto. The role of imitation in generating a shared communication system. *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 2012.
- [6] J.L. Elman. Finding structure in time. *Cognitive science*, Vol. 14, No. 2, pp. 179-211, 1990.
- [7] 柴田克成, 伊藤宏司. 利害の衝突回避のための交渉コミュニケーションの学習-リカレントニューラルネットワークを用いたダイナミックコミュニケーションの学習. 計測自動制御学会論文集, Vol. 35, No. 11, pp. 1346-1354, 1999.