

進化的マルチエージェント強化学習による 言語創発メカニズムの解明

Elucidating Language Emergence Mechanism by Evolutionary Multi-Agent Reinforcement Learning

若林 啓

筑波大学 図書館情報メディア系

1. 研究目的

ヒトの言語は、無限に新しい文を生み出せる創造性を持ち、世代を超えて伝達され進化していく。「なぜヒトだけが創造性のある言語を扱えるのか」という問いに対して、進化言語学の分野では、遺伝と学習の相互作用を理解することが重要であると指摘されてきた (Dor & Jablonka 2001). しかし、遺伝と学習の相互作用は複雑であり、化石証拠や生物実験によって言語の進化の過程を直接観察することも困難であるため、決定的な解明のためには方法論的なブレイクスルーが不可欠な状況である。

この論拠の不足を補う方法論として、深層強化学習を計算モデルとした計算機シミュレーションにより、言語の起源と進化の謎に計算論的論拠を与える研究が注目されている。しかし、深層強化学習には大きな計算コストがかかるため、これまでの研究は1世代のエージェントの学習で創発する言語の分析に留まっており、遺伝的進化と創発言語の関係の解明は、着手されていない課題として残っている。

本研究は、進化計算と深層強化学習を組み合わせた進化的深層強化学習アプローチを提案するとともに、これを用いて、遺伝と学習の相互作用メカニズムの理解を進めることを目的とする。特に、各個体に与えられる学習機会の量が、遺伝的進化や創発言語の性質に与える影響を明らかにすることを目指す。ヒトの言語は、言語表現の部分の意味の組み合わせによって文全体の意味を表現する「構成性」という性質を持っているが、深層強化学習エージェントの創発言語が必ずしも構成性を持つとは限らないことが知られている (Chaabouni ら 2020). 一方で、構成性のある言語は、新しく加わった個体にとって学習しやすい性質がある (Cheng ら 2023) ことから、進化の過程で構成性の高い言語が定着しやすい可能性が示唆されている。本研究では、ニューラルネットワークの初期重みパラメータを遺伝子として設定することで、その進化の方向性が学習機会の量によってどのような影響を受けるかを分析する。例えば、学習機会が多いほど、構成性の高い言語を用いるエージェントの適応度が相対的に向上し、それによって構成性の高い言語を学習しやすい遺伝子（初期重みパラメータ）が集団に広まるといった遺伝的同化現象が起こる可能性が考えられる。シミュレーションを通してこのような仮説を検証することが、本研究の目的である。

2. 研究成果の内容

20 個体のニューラルネットワークエージェントからなる集団を、遺伝的アルゴリズムに従って 1,000 世代にわたって進化させる進化的深層強化学習シミュレーションを実施した。各世代において、個体は集団内の他の個体と繰り返しコミュニケーションゲームを行い、コミュニケーションが成功するように学習する。遺伝子はニューラルネットワークの初期重みパラメータを表すベクトルとし、遺伝子の適応度は、その個体の生涯コミュニケーション成功率とした。次の世代に引き継がれるのは遺伝子の情報のみであり、学習の結果は次の世代には引き継がれない。出生後に学習によるパラメータの更新を行う条件と行わない条件で実験を行い、学習機会の量による影響を分析した。

実験の結果、出生後に学習する条件で進化させた遺伝子は、学習しない条件で進化した遺伝子と比較して、達成可能なコミュニケーション成功率に差異は見られなかったが、それを達成するための創発言語が高い構成性をもつことが明らかになった。これは、構成的な創発言語の方が、より早く学習が進むという性質 (Cheng ら 2023) による影響だと考えられる。出生後に学習する環境では、学習しやすい構成的な創発言語に収束しやすい遺伝子が、生涯コミュニケーション成功率を高める傾向がある。このことから、出生後の学習機会の量には、学習に有利な遺伝子が進化しやすくなる圧力を働かせ、結果的に構成性の高い創発言語を定着させやすくする効果が示唆される。この成果は、第 39 回人工知能学会全国大会 (JSAI2025) で発表する予定である。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムで提供された計算機を用いて、20 個体からなるニューラルネットワークエージェント集団の学習を分散並列で処理することによって、1,000 世代にわたる進化的深層強化学習シミュレーションを現実的な実行時間で行うことが可能になった。本プログラムによる支援は、言語創発における進化と学習の相互作用に関する基礎研究の促進において大きな意義を果たしたと言える。

4. 今後の展望

本研究により、重みパラメータの初期値を遺伝子とした進化的深層強化学習シミュレーションが、言語進化の詳細な過程を解明する有効な手段であることが示された。これにより、従来のモデルでは観察が難しかった進化のメカニズムを定量的に分析する道が拓かれたと考えられる。本研究では、集団の個体数や環境の状態空間の大きさ (伝達すべき情報の種類数) が比較的小規模な設定で検証実験を行なったが、これらのパラメータを変化させることで規模を拡大した追加実験を行い、知見の一般性を検証する必要がある。これにより、学習、遺伝、言語の相互作用メカニズムについて、より詳細な知見の創出が期待される。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

外谷 直人, 若林 啓：進化的深層強化学習を用いた集団創発言語におけるボードウィン効果の観察. 第 39 回人工知能学会全国大会 (JSAI2025), 4 pages, 2025.5

(3) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus		32000	-32000	
Pegasus	○		+16000	
Wisteria/BDEC-01				
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				