

共創的適応環境での進化に個体学習と社会学習が与える影響

The Effects of Individual and Social Learning on the evolution in a Co-creative Fitness Landscape

米納 弘渡^{*1}
Hirotō Yonenoh鈴木 麗壘^{*1}
Reiji Suzuki有田 隆也^{*1}
Takaya Arita^{*1} 名古屋大学 大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Nagoya University, Japan

The effects of learning have been regarded as important factors of the evolutionary process of human linguistic abilities. Our purpose is, with computer simulations, to examine the effects of individual and social learning on the evolution in a co-creative fitness landscape where both cognitive (e.g., hierarchical structures of language) and communicative (e.g., intention sharing) aspects of language abilities are essential. Our simulation results show that collaboration between individual and social learning facilitates the adaptive evolution, which means that both individual and social learning can play roles of enhancing lifetime fitness on such a complex fitness landscape arising from co-creative communications. However, at the same time, it is likely that the adaptive evolution of an individual is hampered by the failure of the acquisition of the high communicative ability. This might be because the adaptive evolution of his partner prevents him from acquiring the high communicative ability.

1. はじめに

人類の言語進化は、生物進化と文化進化の共進化のプロセスとして見なされている[Smith 18]。ここで、生物進化とは、高度な言語を使用する上で必要な巨大な脳や、多様な音韻の発音を可能にする声帯などの遺伝的に規定された言語能力の生物進化のことである。一方、文化進化とは、慣習、規範や言語それ自体など個体が後天的に獲得する文化的特性の進化である。

こうした言語に関する生物と文化の共進化過程において、学習は、生物進化と文化進化の共進化の過程に影響を与える要因として重要視されている[Smith 18][Higashi 18]。実際、ボールドウィン効果[Baldwin 1896]は学習が生物進化に与える影響として注目されている。また、社会的学習に関しては、[Higashi 18]では、社会的学習を成功している他個体の模倣と捉え、個体学習と社会学習の相互作用が、多くの局所的な最大値と最小値(山頂と谷間)を持つ凸凹な適応度地形での適応進化を促進することを明らかにしている。[Higashi 18]では、言語使用に関連する抽象的な言語能力を一つだけ持った個体を想定している。しかし、共創的コミュニケーションのための言語進化の文脈では、認知(思考)能力とコミュニケーション能力という2つの言語能力の進化の考える必要がある[Herman 75]。ここで前者と後者の例としてはそれぞれ、階層性と意図共有が考えられる。前者は[Higashi 18]で想定された抽象的な言語能力として扱うことが出来る。だがコミュニケーション能力に関しては、それは不可能である。なぜなら、コミュニケーション能力を扱うためにはコミュニケーションの相手(対話相手)の存在が必要であり、[Higashi 18]ではその存在が仮定されていないからである。

そこで本研究ではまず、[Higashi 18]で想定された抽象的な言語能力を認知能力として扱いつつ、同時に、対話相手の存在を仮定することでモデルを拡張し、認知能力(認知適応度)とコミュニケーション能力(コミュニケーション適応度)の両方の言語能力が適応上必要不可欠な適応環境(共創的適応環境)を想定する。そして、以下の3つの学習条件: 1. 学習なし; 2. 個体学習のみ; 3. 個体学習と社会学習の両方(以下、両学習と呼ぶ)

を想定し、共創的適応環境での適応進化に学習が与える影響を計算機実験の手法を用いて調査する。

2. モデル

上述した目的を達成するため、[Higashi 18]のモデルをベース・モデルとして、言語を使用する個体のエージェント・モデルを作成する。表1にあるように、本モデルの各個体はM個の形質 t_i ($i = 0, \dots, M-1$)を $[1, M]$ の範囲の整数として持つと仮定する。また、各遺伝子 g_i ($i = 0, \dots, M-1$)は t_i の初期値(学習前の形質)である。また更に、各個体は、1か0のどちらかの値を取る可塑性(学習可能性) p_i ($i = 0, \dots, M-1$)を持つ。表1では、 p_i が1となる遺伝子・形質(可塑性のある遺伝子・形質)に色をつけて強調している。可塑性のある遺伝子 g_i は個体学習と社会学習という2種類の学習(個体学習と社会学習については後述する)を通して、 $[1, M] \cap [g_i - 1, g_i + 1]$ の範囲の整数 t_i に変化することができる。また最後に、各個体は社会的学習率 s を $[0, 1]$ 上の実数として持つ。 s は遺伝的に与えられる。

表1. 個体の例(M=10)

t_i	7	7	7	7	5	5	6	7	7	7
g_i	7	7	7	7	6	4	6	6	7	7
p_i	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
s	0.36									

2.1 共創的適応度

本研究では、言語を用いての個体間のコミュニケーションを表現するために、各世代の開始時に、各個体は、集団内全体からランダムに選ばれた自分以外の他個体(対話相手)と組み合わせられると想定した。そしてその上で、各個体の適応度である共創的適応度 *Fitness* を図1のように以下の2つの要素の積 $Fitness = COG \times COM$ として定義した: (a) 自身の認知(思考)能力を通して得られる適応的利益(認知適応度 *COG*); (b) 自身のコミュニケーション能力を通して得られる適応的利益(コミュニケーション適応度 *COM*)。

連絡先: 米納弘渡, 名古屋大学大学院 情報学研究科, 愛知県名古屋市中千種区不老町 〒464-8601, 052-789-4258, yonenoh.hiroto@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

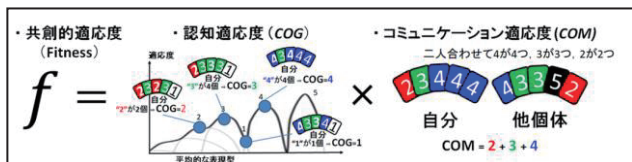


図 1: 共創的適応度 (M=5)

各個体の認知適応度は、その個体の形質のみを用いて計算される。認知適応度関数 COG は以下の式(1)で表される凸凹型の関数として定義される:

$$COG = \arg \max (f(n)) \quad (1)$$

$$f(n) = \begin{cases} n & (\text{if } num_{self}(n) \geq n) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $num_{self}(n)$ はその個体が持つ値 n の形質値の総数である。各値 n はその使用者にレベル n の認知能力を要求する言語を意味する。個体は思考用の言語として、その個体可以使用できる言語のうち最大レベルの言語である COG を用いる。個体は、よりレベルの高い思考用言語を使うほどより高い思考能力を持つことが出来、より高い適応度を得る事が出来る。

この認知適応度関数は[Higashi 18]で使用していた適応度関数と同じものであり、その値は 0 から 10 の整数値で表される。図 2 の青線は、 $M=10$ の個体の形質が特定のルートを通して横軸の最小値から最大値に変化していく際の認知適応度地形のイメージを表している。ここで、横軸はその個体の遺伝子、もしくは形質の値の平均(Average Phenotypic Value: APV)を表しており、その高さ n の山頂は、条件 $num_{self}(n) \geq n$ を満たした形質に対応している。図 2 で示されるように、青線で表される COG は APV が低いうちは単調増加していくが、APV が増加していくと途中か凸凹になっていく。これは、個体の認知適応度が増加するほど、より高い認知適応度を獲得するには一端既存の適応性を捨てなければならないということを示している。

一方、個体のコミュニケーション適応度は、認知適応度と異なり、計算に自身の形質に加えて対話相手の形質も用いる必要がある。コミュニケーション適応度関数 COM は以下の式(3)で定義される:

$$COM = \sum_{n=1}^M g(n) \quad (3)$$

$$g(n) = \begin{cases} n & (\text{if } num_{self}(n) + num_{partner}(n) \geq n) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $num_{partner}(n)$ はその個体の対話相手が持つ値 n の形質値の総数であり、 COM は $COM \geq COG$ を常に満たす。(1)の COG が $f(n)$ の最大値として計算されているのと異なり、(3)の COM は $g(n)$ の和として定義されている。このように定義したのは、各個体がコミュニケーションのために複数の言語を使用し多言語使用から追加的利益を得ることが出来ると想定したためである。尚、 COM の値は 0 から 20 の整数値で表される。

ここで、単純化のために、自身の形質と対話相手の形質が同一と仮定する。すると、 $COM \leq COG + 2 \times (M - COG)$ が成り立つ。そのため、以上から、ある個体の COM の適応度地形は、 COG を表す青線と、 COM が取り得る値の最大値を表す赤線の間のどこかに位置することになる。ここで、点線は COM の適応度地形の具体例のイメージ図である。

しかし、この図はあくまで、自身の形質と対話相手の形質が同一という仮定の下で成り立つものであり、この仮定は本研究のシミュレーションでは一般には成り立たない。そのため、2 次元

グラフとして表した場合の COM の適応度地形は対話相手の形質に依存し、動的に変化する。この点には注意すべきである。

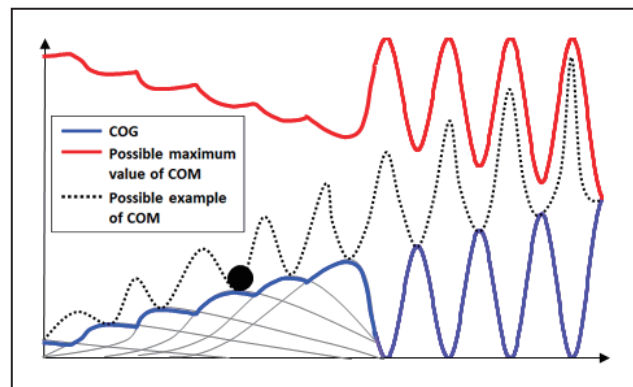


図 2: 認知・コミュニケーション適応度それぞれの適応度地形のイメージ (M=10)

2.2 学習と進化

各世代、各個体は同一タイミングで、自身の対話相手と相互作用し、個体学習、もしくは社会学習を L 回行う。各学習ステップで、社会的学習率が s の個体は、確率 s で社会的学習を、確率 $1-s$ で個体学習を行う(図 3)。

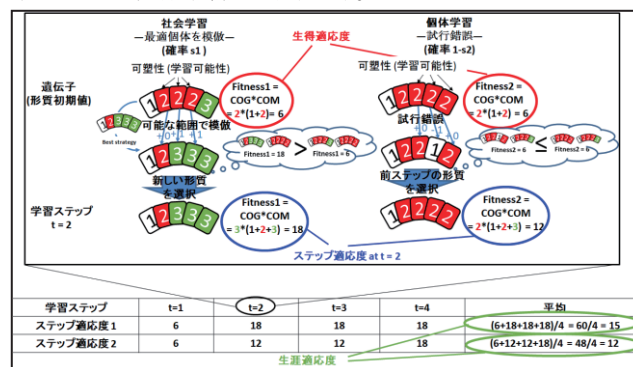


図 3: 個体学習と社会的学習の例 (M=5&L=4)

個体学習を選んだ個体は、自身の可塑性のある形質それぞれに対して、その初期値である遺伝子に $\{-1, 0, 1\}$ からランダムに選ばれた値を足すことで、その値を変化させ、新しい形質値を得る。尚、ランダムに選ばれた値が 0 のときは、その形質値は遺伝子と同一である。その後、個体は、現在の学習ステップでの自分の対話相手の形質は前ステップと変わっていないという想定をしながら、新しい形質値を用いて自身の適応度を計算する。このとき、得られた適応度が前ステップでの適応度(尚、現在がその世代の最初の学習ステップの場合は、前ステップでの適応度の代わりに、生得適応度を用いる)より高ければ、その個体は新しい形質を使うことを選び、そうでない場合には、前ステップで使った形質値を使うことを選ぶ。また、このとき、同時にその個体の対話相手も同じ意志決定を行う。このようにして自身とその対話相手が現在の学習ステップでの形質を選ばると、今度はその形質を用いて、彼らの現在の学習ステップでの適応度が計算される。この適応度はステップ適応度と呼ばれる。尚、自分だけでなく対話相手の形質も変化するため、現在の学習ステップでのステップ適応度が前ステップでのステップ適応度より低くなることもありえることには注意が必要である。

一方、社会学習を選んだ個体は、その一つ前の学習ステップにおいて集団の中で最大の適応度を獲得した個体(一つ前の学習ステップでの最適個体)の形質をできるだけ模倣しようとす

る。具体的には、社会的学習を選んだ個体は、自身の可塑性のある形質が、対応する一つ前の学習ステップでの最適個体の形質にできるだけ近くなるように、対応する遺伝子に $\{-1, 0, 1\}$ からランダムに選ばれた値を加える。その後、個体は個体学習の場合と同じやり方で、現在の学習ステップでの自分の形質と適応度を決定する。

各個体はこうした作業を L 回繰り返した後で、以下の 2 種類の適応度: (i) 得適応度 (遺伝子を用いて計算した適応度); (ii) 生涯適応度 (その世代での全学習ステップでのステップ適応度の平均) を得る。そして最後に、寿命を終えた個体は生涯適応度を用いたルーレット選択に従い、突然変異ありで子孫を残す。以上が本計算機実験での 1 世代での流れである。

3. 結果と考察

3.1 平均適応度の比較

実験結果を調査するための指標として、20 世代、15,000 世代分の以下の 6 種の適応度の集団平均を計算し、そのラスト 1,500 世代の世代平均を出力した: (I) 生得 *COG*; (II) 生得 *COM*; (III) 生得 *Fitness*; (IV) 生涯 *COG*; (V) 生涯 *COM*; (VI) 生涯 *Fitness*。言い換えると、3 種の学習条件それぞれに対して 6 種の平均適応度を計算し、合計 18 種の平均適応度を出力した (図 4)。

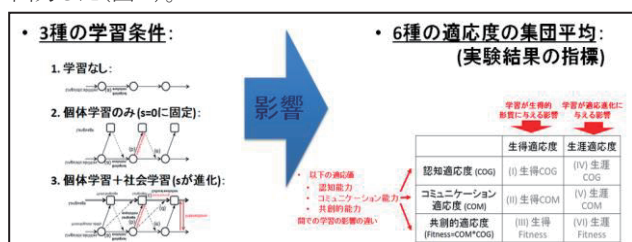


図 4: 実験結果

その結果、得られた図が図 5 である。赤い矢印は、矢印の始点の値が終点の値より有意に低いことを示している。尚、有意差の有無は、 $\alpha = 0.05$ のウィルコクソンの符号付順位検定を用いたライアンの手法で確認した。

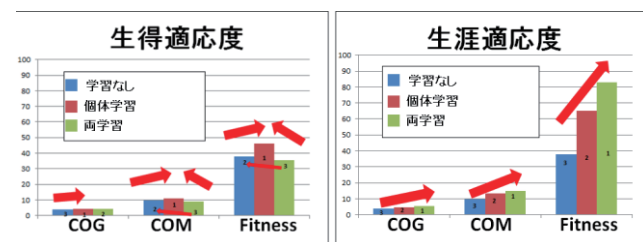


図 5: 平均適応度の比較

図 5 より以下のことがわかる。

- 結果 1: 認知・コミュニケーション・共創的の全てで、生涯適応度は以下の順で高い
・ [学習なし] < [個体学習] < [両学習]
- 結果 2: 認知・コミュニケーション・共創的の全てで、生得適応度では以下が成り立つ
a. [学習なし] < [個体学習]
b. [個体学習] $\geq$ [両学習]

結果 1 は個体学習と社会学習はどちらも、生涯適応度を増加させることを示している。これは、2 つの学習がどちらも適応進化を促進することを意味している。一方、結果 2.a は、個体学習がそれ単体で、生涯適応度だけでなく、生得適応度も増加させることを意味している。この結果は追加分析により、学習が生物進化に与えるメカニズムであるボールドウィン効果[Baldwin 1896]と

その一部である遺伝的同化[Waddington 53]と呼ばれる現象の影響により生じたことがわかった。最後に、結果 2.b は、個体学習に社会学習を追加することで逆に生得適応度が下がることを示している。この結果は追加分析により、コミュニケーション相手の適応進化が自身の適応進化を阻害することで生じた可能性が示された。

3.2 個体学習単体の効果の分析

4-1.では、結果 2.a がボールドウィン効果により生じていると述べた。以下ではその証拠を示す。ボールドウィン効果とは、学習によって獲得した形質が進化に与える影響のことである。ボールドウィン効果は 2 つのプロセスからなる。まず、最初のプロセスでは、可塑性 (学習可能性) を持った個体が学習を通して新規の適応形質を獲得し、可塑性 (学習可能性) を持った個体が集団内でその数を増やしていく。このプロセスは、可塑性 (学習可能性) の進化と呼ばれる。次に、2 つ目のプロセスでは、学習で新規の適応形質を獲得した個体内で、新規の適応形質を速く獲得した個体が、遅く獲得した個体より高い適応度を獲得し、その数を増やす。その結果、最終的には、学習前の時点で既に新規の適応形質を有する個体が出現し、学習前の時点で既に新規の適応形質を有する個体の数が集団内で増えていく。この 2 つ目のプロセスは遺伝的同化[Waddington 53]と呼ばれる。

そこで、この 2 つのプロセスが個体学習条件で生じていることを確認するために、我々の計算機実験上の個体が実際に通った共創的適応度地の概形を調べた。その結果が以下の図 6 である。図 6 の上の図と下の図はそれぞれ、学習なし条件と個体学習条件での結果であり、それぞれの横軸は、個体とその個体の対話相手の遺伝子・形質値の平均 (Average Phenotypic value: APV) を表し、縦軸は、その個体の共創的適応度を表している。図 6 は、各世代で最大の生涯共創的適応度を獲得した個体 (各世代の最適個体) の一部をランダムに選び、その学習前と学習後の値を上記した 2 次元グラフ上にプロットし両者の点を線で繋げ作成したものである。

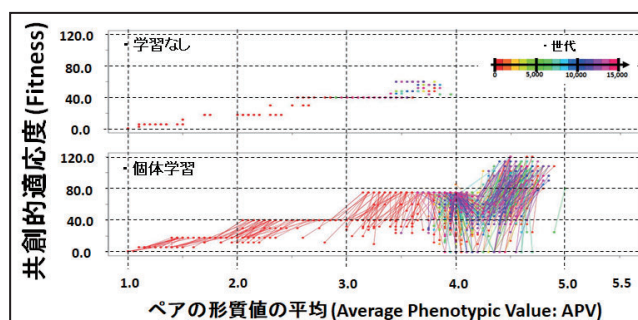


図 6: 学習なし条件と個体学習条件で各世代の最適個体が通った経路での共創的適応度地形

図 6 の学習なし条件と個体学習条件を比較すると、前者では見られなかった学習を示す線が後者では確認でき、かつ、図内で獲得された適応度 (および APV) の最大値は前者より後者の方が高くなっていることが確認できる。このことから、個体学習条件では、ボールドウィン効果の最初のプロセスである可塑性 (学習可能性) の進化が起きていることがわかる。この結果は、個体学習が、個体が新規の適応形質を発見することを可能にする機能を担っていることを示している。また、図 6 の下の図を見ると、個体学習条件では 14,000 世代前あたりで、最適個体の学習前適応度 (生得適応度) と学習後適応度 (最低ステップ適応度) が一致し、学習を表す線が横に並行に引かれていることが確認できる。この結果は獲得形質である学習後適応度が遺伝形質である学習前適応度になったことを表しており、このことから、個体学

習条件では、ボールドウィン効果の 2 つ目のプロセスである遺伝的同化が起きていることがわかる。

3.3 個体学習と社会学習の協働の効果の分析

4-1.では、結果 2.b がコミュニケーション相手の適応進化が自身の適応進化を阻害することで生じた可能性があると述べた。以下ではその証拠を示す。図 7 の 3 つの上中下の図はそれぞれ、両学習条件で各世代の最適個体が通った経路での共創的・認知・コミュニケーションそれぞれでの適応度地形である。

まず、図 7 の一番上の図を見ると、適応度が 20,40,80 辺りのそれぞれで、最適個体の学習前適応度(生得適応度)と学習後適応度(最低ステップ適応度)が一致し、学習を表す線が横に並行に引かれていることがわかる。これは、図 6 の個体学習条件の場合と同じく、両学習条件でも遺伝的同化が生じていることを意味している。しかし、適応度が 100 前後ではこうしたことは起きていない。そのため、十分に APV が高くなった後は遺伝的同化が生じなくなっていることがわかる。

続いて、図 7 の中央と下の図である認知とコミュニケーションの適応度地形を比較する。すると、十分に APV が高くなった後の 12,000~13,000 世代以降では学習前と学習後の適応度の差は、コミュニケーションにおいての方が認知より高いことがわかる。これは、コミュニケーションの方が認知より遺伝的同化が生じにくいことを意味していると考えることができる。コミュニケーション適応度において、遺伝的同化が生じにくい原因としては、パートナーの遺伝子・形質の変化によりコミュニケーション適応度地形が変化して谷が深くなり、自身の遺伝子・形質の進化が阻害された可能性が示唆される。

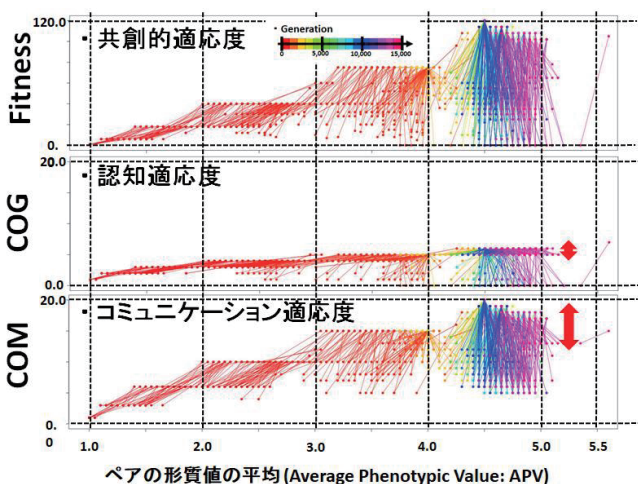


図 7: 両学習条件での適応度地形

4. 結論

本研究では、3 種の学習条件で計算機実験を行うことで、認知(思考)能力とコミュニケーション能力という 2 種の言語能力が必須な適応環境(共創的言語環境)での進化に学習が与える影響を調査した。得られた結果は以下の通りである。

1. 共創的言語環境において、個体学習はそれ単体で、生涯適応度に加え、生得適応度も上昇させる。こうしたことが起こる原因はボールドウィン効果(可塑性の進化と遺伝的同化)である。
2. 共創的言語環境において、個体学習と社会学習は協働することで適応進化をある程度まで促進させる。個体学習と社会学習の役割は以下の通りである(図 8)。

- 社会学習:
 - ・ 集団の多数が先駆者(新規の適応形質を発見し集団内で最大適応度を獲得した個体)に追随することを可能にすることで、集団内に適応形質を普及・維持させる。
- 個体学習:
 - ・ 個体が新規の適応形質を発見し、先駆者になることを可能にすることで生涯適応度を上昇させる一方、ボールドウィン効果により生涯適応度だけでなく、生得適応度も上昇させる。
 - ・ しかし十分に進化が進むと、遺伝的同化は起きなくなる。この傾向はコミュニケーション適応度において顕著である。コミュニケーション適応度において遺伝的同化が生じにくい原因は、パートナーの遺伝子・形質の変化によりコミュニケーション適応度地形が変化して谷が深くなり、自身の遺伝子・形質の進化が阻害されたためである可能性がある。

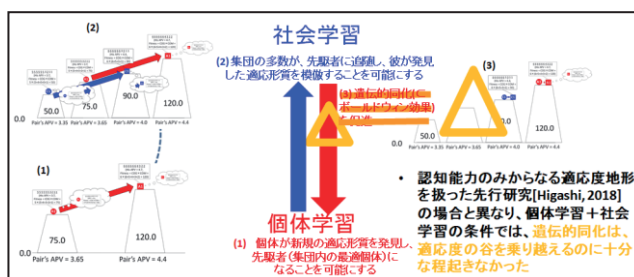


図 8: 個体学習と社会学習の協働時の各々の学習の適応進化への役割

本研究では、認知能力とコミュニケーション能力の積を個体の適応度とした。そのため、この 2 つの能力が相互作用し共進化する動的過程を陽に扱うことが出来なかった。そこで現在、この 2 つの能力の相互作用する動的過程に焦点を当てたモデル[Azumagakito 11]をベースに研究を行っているところである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP 17H06383 の成果を受けたものです。

参考文献

- [Smith 18] Smith, K.: How culture and biology interact to shape language and the language faculty. *Topics in Cognitive Sciences*, DOI: 10.1111/tops.12377 (2018)
- [Higashi 18] Higashi, M., Suzuki, R. and Arita, T.: The Role of Social Learning in the Evolution on a Rugged Fitness Landscape. *Frontiers in Physics*, Vol. 6 (2018).
- [Baldwin 1896] Baldwin, J. M.: A new factor in evolution. *The American Naturalist*, Vol. 30, No. 354, pp.441-451 (1896)
- [Herman 75] Harman, G.: Language, thought, and communication. In: K. Gunderson (ed), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 7, pp.270-298 (1975)
- [Waddington 53] Waddington, C. H.: Genetic assimilation of an acquired character. *Evolution*, Vol. 7, pp.118-126 (1953)
- [Azumagakito 11] Azumagakito, T., Suzuki, R. and Arita, T.: Visualizing language evolution as an emergent phenomenon based on biological evolution and learning. *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16, pp.366-372 (2011)