

ロボット巡航環境における中立発現による進化と多様性

7G-6

土田 将弘 星野 力
筑波大学 構造工学系

1 はじめに

生物が、遺伝子型（染色体表現）から表現型（個体）を発生し、自身が置かれた環境下で行動を起こす過程においては、複数の階層で、表現効果がなく生存（適応度）に影響がない「中立」な部分が存在する。この中立には、通常多くの変異（多様性）が偶然的浮動により蓄積している [1]。本研究では、中立変異に関して、普段はジャンク DNA で機能を持たないが、ある世代で、別の突然変異により開放された中立部分が表現型進化に貢献するという仮説の検証を行ってきた [2][3]。本稿[†]ではロボット巡航環境におけるニューラルネットワーク進化の発現をタイプ別に分類・内部解析を行った結果を総合し、中立が進化と多様性に及ぼす影響に関して得た知見について報告する。

2 実験モデルについて

ロボット巡航モデルの概要に関しては [2][3] を参照のこと。

2.1 発生経路

本研究のモデルでは以下の発生経路 (Path) を定義した。

- Gene …染色体記述への経路 (Path 0)
- Neurons …ニューロン発生経路 (Path 1)
- Neural-Network …有効ニューロン発生経路 (Path 2)
- Behavior …行動 (適応度 (fitness)) 影響への経路

Behavior は Gene, Neurons, Neural-Network 各々に関して考えられ、それぞれ Path が 3,4,5 となる。Path 0,1,2 が中立 (neutral) で、Path 3,4,5 が非中立 (unneutral) である。

2.2 Gene Power

発生経路を算出する為に Gene Power という値を定義する。

$$GenePower \stackrel{def}{=} \frac{(OrgFitness) - (DeletedFitness)}{(OrgFitness)} \times 100(\%)$$

- Org Fitness …元の個体の適応度 (Original fitness)
- Deleted Fitness …対象とする遺伝子を働かなくした場合の適応度

Gene Power は遺伝子単独の影響力を表す。

(if GenePower = 0 ⇒ neutral, else unneutral)

2.3 発現 (manifestation) 分類

「発現」を「親の世代で存在しなかったもの (ニューロン・機能) が子の世代で発生すること。」と定義する。それをを用い以下の発現分類を定義する。

- type 1 … Neurons 中にニューロンが「発現」

- type 2 … Neural-Network 中にニューロンが「発現」
- type 3 …機能 (unneutral) の「発現」

発現については、逆 (ニューロン・機能の消失 (Disappearance)) も考慮する。これを type 1', type 2', type 3', と定義する。

3 実験例 (結果及び考察)

mg = 1000, pop = 30, elite = 2, mr = 0.05, dr = 0.3, ir = 0.5, mrr = 0.1, sp = (60, 200, 0) (条件)

Figure 1 に最高評価値、染色体長、ニューロン数、遺伝子型 - 表現型 - 行動数の推移を示す。この進化例では 59 世代に評価値 400 → 4000 の断続平衡的進化が起きている。ここでは以下の現象が中立進化説の立場から観測された。

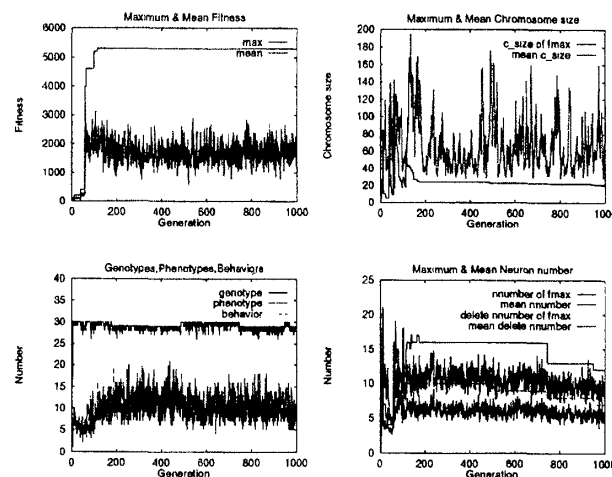


Figure 1: Fitness(upper left), Chromosome size (upper right), Neuron number(lower right), and Number of genotypes/phenotypes/behaviors(lower left)

- 大進化前に表現型数の減少→表現型レベルでの均質化 (中立部分への変異の蓄積が進行している。)
- 大進化による染色体長の伸長→染色体長が大きくなり、中立部分を多くもつ個体が親になったことにより大進化が引き起こされたことを示唆する。
- 大進化後の表現型数の増加→高適応個体の出現による淘汰圧の緩みによる適応放散現象 (中立部分の開放)
- Chromosome-Neurons-DeleteNeurons 間のギャップの存在→染色体に冗長性が存在することがわかる。この冗長な部分は中立として振る舞う。(調節遺伝子の影響により Chromosome-Neurons 間でギャップが大きい。)

Figure 2 に 59 世代で出現したエリート個体 (59.0) とその親である 58.10 と 58.11 (それぞれ、58 世代の 10,11 番目の個体) 示す。58 世代の評価値 400 の個体では、左回転速度が

[†]Manifestation of Neutral Mutations in Evolving Robot Navigation

遅い為、左折環境に適応できない。より詳しく分析するために、Table 1,2 に大進化前後等の発現状況の詳細を示し考察を行う。

- 左折環境に適応を促した最大の要因の遺伝子 (2,234,0.632426) (Position = 112) は 58.10 で Path 0 (Position = 112) である。これが type1,2,3 の発現し、59.0 では Path 5 となった。中立発現が進化に貢献した顕著な例である。
- 10,11 の親 (染色体長 125,147) によりエリートが誕生したことから、中立部分を多く保持することが (58 世代のエリートの染色体長は 9, 評価値は 58.0,10,11 共 400 で親への選択確率は等しい) 進化に貢献すると示唆される。
- (174,233,0.211011) (Position = 124) は、type3' で機能が消失しているが、これは (163,236,0.443759) (type 1,2 発現、Position = 121) とモータ 5 (R, +1) の回転に関し冗長な構造を創る為である。これにより染色体が安定する (遺伝子変異に強くなる) 効果が得られている。
- (200,81,-0.512919) (Position = 113) は、この世代唯一の others である。この others は変異の履歴を調査すると、逆転写 (挿入) や機能遺伝子変異ではなく 58 世代の (156,179,0.248210) が変異したものであることがわかる。この 58 世代の遺伝子は Path 1 (cf. Table 1) であるから、この others は中立部分から新発生した遺伝子となる。
- 大進化 (評価値 +1000 以上) である 59 世代では、(type 1,type2,type3) = (8,5,1) と他の世代の進化と比較して極端に多い。このことは進化には中立遺伝子が関与する可能性を強固にする。(type 3' や others も存在するが前述のように双方、中立が関与しており、中立部分は進化に重要な役割を果たしていると言える。)

Table 1: Summary of the manifestation

[59.0] Position Path	gene (x,y,weight)	[58.10] Position Path	[58.11] Position Path	Types
3 2	(156,179,0.248210)	3 1	3 1	2
115 2	(184,62,0.707739)	57 0	112 0	1,2
124 2	(174,233,0.211011)	124 5	146 5	3'
112 5	(2,234,0.632426)	112 0	* *	1,2,3
113 2	(200,81,-0.512919)	* *	* *	others
116 2	(95,214,0.735673)	116 0	* *	1,2
117 1	(170,205,-0.243531)	117 0	* *	1
118 1	(5,4,0.619922)	118 0	* *	1
121 2	(163,236,0.443759)	121 0	118 0	1,2
122 1	(188,184,0.031454)	122 0	* *	1
123 1	(155,141,0.000264)	123 0	* *	1

Table 2: Summary of the Number of Types

Jumps at generations (fitness jump)	Number of Manifestation Types of						
	1	2	3	1'	2'	3'	others
5 (0 to 100)	0	1	0	0	0	0	10
11 (100 to 200)	0	0	3	2	2	1	2
40 (200 to 400)	0	0	0	1	1	1	1
59 (400 to 4000)	8	5	1	0	0	1	1
65 (4000 to 4600)	0	1	1	0	0	2	2
100 (4600 to 5200)	0	0	1	0	0	0	10
115 (5200 to 5300)	0	0	3	0	0	1	0

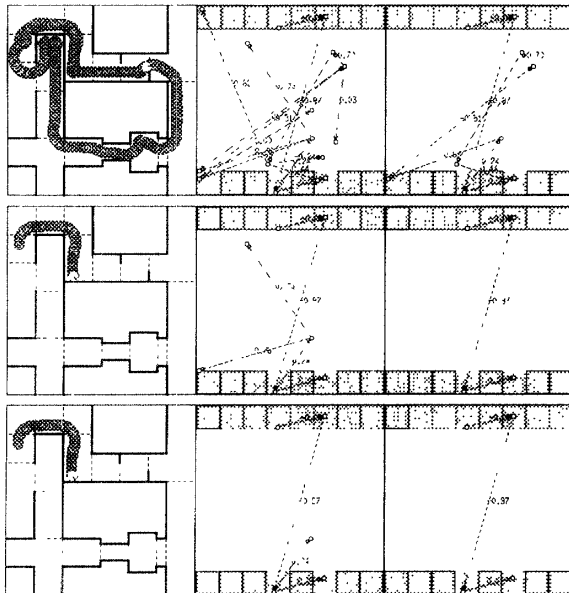


Figure 2: The navigation trajectory and neural networks of the offspring 59.0 (upper) with the new links from sensor 5 (the 3rd box from the right on the upper edge) to motor 0 (the left lower corner box), and parents 58.10 (middle) and 58.11 (lower)

4 結論

本稿の実験例の結果から、中立部分の存在及び発現が、遺伝子の安定や進化に貢献しているという例証がいくつか得られた。中立部分を設定し、淘汰圧をかけないモデルにおいて大進化 (断続平衡的進化) が起こることに論理的矛盾がないことが示された (中立説を模擬、再現することが成された段階) と言える。本研究のような実在の生物からすれば大幅に単純化したモデルでも、中立説の立場からの観察により興味深い現象が観測されることから、進化的計算等の応用面において積極的に中立に着目することは有益であると結論付けられる。

参考文献

- [1] M. Kimura: The Neutral Theory of Molecular Evolution, Cambridge Univ. Press, 1983
- [2] 土田 将弘, 星野 力: ロボット巡航進化における中立遺伝子の発現, 人工知能学会並列人工知能研究会, SIG-PPAI, (第9回), 1996
- [3] T. Hoshino and M. Tsuchida: Manifestation of Neutral Genes in Evolving Robot Navigation. In Artificial Life V, Sciences of Complexity. Addison-Wesley, 1996