

振動子網を用いた行動遷移メカニズムの考察

Development of Behavioral Transition Model by using Oscillator Network

船戸徹郎 (東工大) ○倉林大輔 (東工大) 奈良維仁 (東工大) 青沼仁志 (北大)

T.Funato†, D.Kurabayashi†, M.Nara†, H.Aonuma†

†: Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

‡: Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0812, Japan

Abstract: Insects have only a little brain but the behavior is highly adaptive. We consider that physical structure of the neural network works on the creation of the brain function and model the behavioral processor that controlled by its structural disposition. Nonlinear oscillator changes the behavior depends on the connection relationship, and the existence of oscillator and the function have been shown in antennal lobe(AL) of locust. Moreover, the structure of cricket AL changes by battle experience. Therefore, we model the function of AL using an oscillator network. Then, we realized the model with electrical circuit, and proposed a simple robot model which follows a real insect behavior.

Keywords: Network Structure, Nonlinear Oscillator, Antennal lobe

1. はじめに

VLSI 技術の発達によって、現在では一つの CPU 上に 10 億個もの素子が存在する。これに対して昆虫脳内の神経細胞は 4 万個程度と言われ、単純な数字上の比較では工学システムが微小脳に肉薄しているように見える。しかし昆虫のもつ適応的・即応的な行動発現は人工システムにおいて未だに実現できていない。したがって脳機能の実現に、素子数では議論できない効果が存在することは明らかである。近年スモールワールド (SW) 構造のように、ネットワークの構造自体が機能形成を持つことが分かってきており、インターネットや交通路線網¹⁾から、病気の蔓延過程といった社会現象に至る様々な事象に見られることが指摘²⁾³⁾され、注目を集めている。さらには生物の脳においても、機能的な面から、触角葉における SW 構造の存在が指摘⁴⁾され、線虫の神経では、構造的な面から SW 構造が存在する⁵⁾といった主張も存在する。

そこで本研究では、脳機能の生成にこのような物理的構造の効果に関与していると考え、構造面から機能発現メカニズムの工学的再構成を目指す。

本研究では、昆虫の脳のなかで、嗅覚の処理機構に注目する。化学物質であるフェロモンは嗅覚刺激と同じプロセスで処理される。蟻やコオロギなどの多くの昆虫はコミュニケーションの手段としてフェロモンを用いる。コオロギは喧嘩を行った別のコオロギのフェロモンを覚え、再び同じコオロギに出会うと、以前の喧嘩の結果によって、攻撃・逃走を選択する。この行動の切り替え時に、脳内では NO(一酸化窒素)が放出され、接続構造が切り替わっている⁶⁾と見られている。したがって、コオロギの嗅覚処理機構では構造遷移が行動機能の生成を行っていると考えられる。

モデル化を行うに当たって、本研究では振動子の働きを用いることにする。複数の非線形振動子を接続すると、その接続関係によって同期、収束状態に大きな影響が生じる。これまでの研究では、複数の固有振動数からなる結合振動子の回路で、各振動子に操作を加えることなしに、回路の構造上の変更によって収束状態(同期状態)が操作できること示している⁷⁾⁸⁾。また、生物の嗅覚の処理において、バッタ、

ゴキブリ、ミツバチ、スズメバチなど、様々な昆虫で 15-30[Hz]程度の振動が確認され⁹⁾、臭いに応じて振動の同期関係が変化することが分かっている¹⁰⁾。

本報では、結合振動子系を用いて構造に応じて行動が切り替わるような触角葉のモデルを作成し、実際の振動子(van der Pol 振動子)を用いて電子回路でモデルの挙動を行う。さらに、このような単純な回路によって自律的な行動の切り替えを示すロボットの考察を行う。

2. 情報処理モデル

2.1 触角情報の流れ

触角を通して入力された嗅覚情報が、各器官で処理されるプロセスを調べることで、情報の流れを中心としたモデルを作成する。

フェロモン情報は触角内の受容体で感知され、電気信号となって触角葉に送られる。触角葉には糸球体とよばれる複数の球状の器官が存在し、触角葉に入った情報は糸球体によって刺激の種類に応じて分類され、プロジェクションニューロン(PN)によってキノコ体、及び行動へとつながる¹¹⁾。PN では振動が観測されており、嗅覚情報はこの振動の同期関係によって判断される¹⁰⁾。また PN は局所介在ニューロン(LIN)によって接続されている。

このような知見に基づいて情報の流れを描くと Fig. 1 のような関係になる。図の矢印は指向性を持つ情報の流れを表している。この中で、LIN 上には矢印を付けていない。この理由は触角葉では多数の LIN が存在し、糸球体間は複数の LIN を介して双方向に情報が流れると考えられるからである。さらに、この図から接続関係のみを抽出すると、Fig. 2 のようになる。

2.2 振動子による機能モデル

次に、振動子を用いて触角葉の処理機能をモデル化する。本研究で対象とする機能は、

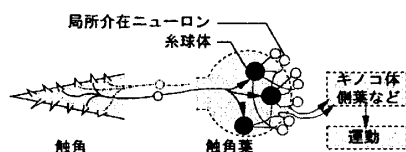


Figure 1: 嗅覚情報処理の流れ

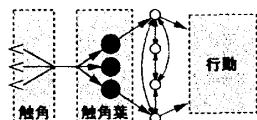


Figure 2: 嗅覚処理系の接続関係

- i) 嗅覚情報を分類して振動子間の同期で表す
- ii) 接続関係の変化によって行動を切り替えるの2点である。

i) 嗅覚情報の処理 まずはじめに、嗅覚情報に応じて振動子の同期関係を切り替えるような機能を考える。

Fig. 2の中から、1つの糸球体を通る情報の流れに注目し、Fig. 3のように、糸球体を通じた情報が、複数の振動子を介してキノコ体、及び行動へと出力されるようなシステムを考える。図で、円で表されているものが振動子であり、矢印に沿って振動が伝わっていく。また、各振動子はそれぞれ固有振動数が異なり、刺激がない状態では同期を生じない。このシステムに嗅覚刺激が入ると糸球体(黒円)が振動し、その振動子が周りの各振動子に伝わって引き込み合うことにより、振動子間の同期が起きる。

例として各振動子の固有振動数を決め、そのときの挙動を調べる。Fig. 3(a)のように8個の振動子がそれぞれ0.5から1.0までの固有振動数を持っているとする。ここでこれらの振動子は、接続している振動子との振動数の差が0.05以下の時に同期をし、互いの振動数の中間の振動になるような特性を持つと仮定する。嗅覚刺激に応じて中央の振動子が0.55から0.75までの振動を生じるとすると、振動子の同期関係がTable 1のように変化する。このようにして、入力刺激に応じた振動子の同期が観測される。

ii) 行動切り替え コオロギは過去の喧嘩の経験によって、行動を切り替えるが、そのとき脳内ではNOが生成される

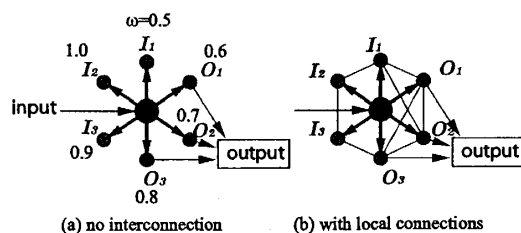


Figure 3: 処理系2態

Table 1: 嗅覚情報

入力振動数	同期した振動子
0.55	なし
0.65	O_1, O_2
0.75	O_2, O_3

Table 2: 嗅覚情報と対応する挙動

入力振動数	同期した振動子	対応する挙動
0.55	(なし→) なし	(無視→) 無視
0.65	$(O_1, O_2 \rightarrow) O_1, O_2, O_3$	(喧嘩→) 回避
0.75	$(O_2, O_3 \rightarrow)$ なし	(喧嘩→) 無視

ことが分かっている⁶⁾。NOはキノコ体と触角葉で働くと考えられており、その作用によってLINの接続が切り替わる。このようにコオロギの脳内では、接続構造が切り替わることによって行動を変えると言える。提案しているモデル上では、振動子間の接続構造を変化させることで、このような機能の実現が可能となる。

LINによって新たに振動子間の接続が加わり、Fig. 3(b)のような構造になったとする。このとき、先ほどの振動子の数値例を考えると、振動子 I_1, O_1, O_2, O_3 は互いに密な接続ができていたため、同期して振動数がすべて0.65になる。このような接続を加えたシステムに対して、接続が無かったときと同じ入力を与えると、それに対応する同期関係はTable 2のようになる。

ここで得られた結果は、同じ入力信号に対して、接続が切り替わるだけで挙動が変わることを示しており、NOによる神経回路の切り替えがコオロギの行動を変えるような機構をモデル化できていると考えられる。これによって、構造の変化により、経験に基づく行動変化という脳機能の一部を模倣的に生成することが可能となった。

3. 電気回路による挙動の検証

作成した触角葉の行動選択回路をアナログ電子回路で実装し、実際に接続関係の変化だけで、行動として現れる収束状態に変化が生じることを確認する。

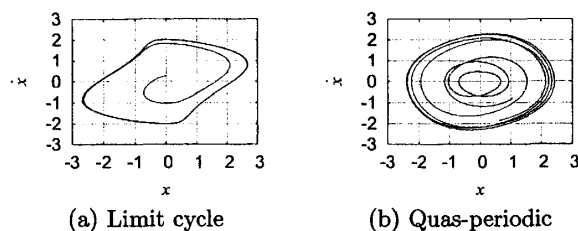


Figure 4: 振動子の状態

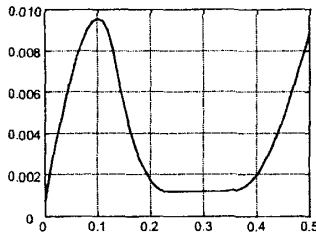


Figure 5: トンネルダイオード (1N3858) の V-I 特性

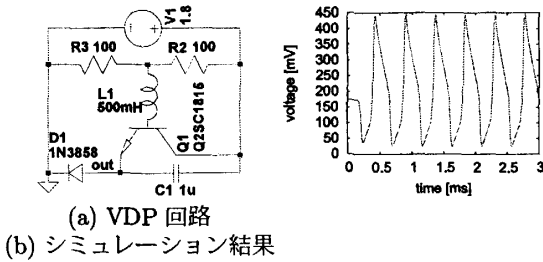


Figure 6: VDP 回路とその挙動

3.1 van der Pol 振動子

非線型振動子として、様々な研究で用いられている van der Pol 振動子 (VDP) を考える。

$$\ddot{x}_1 - \epsilon_1(1 - x_1^2)\dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = 0 \quad (1)$$

非線型振動子同士を結合すると、互いに同じ周期に引き込もうとする力を発生する。この作用は

$$x_i(t+1) = \tilde{x}_i(t) + \epsilon \left\{ \frac{1}{N_i(t)} \sum_{j=1}^{N_i(t)} x_j(t) - x_i(t) \right\} \quad (2)$$

という式で表すことができる。ただし $\tilde{x}_i(t)$ は時刻 t から $t+1$ に 1 のみによって更新された後の状態を表す。

VDP 振動子は、定常時にリミットサイクルと呼ばれる安定な軌道上をもち (Fig. 4(a)), 結合によって同期した振動子は、それぞれが同じ周期を持ったリミットサイクルを描く。それに対し、同期関係を保てなくなった結合振動子は、概周期振動と呼ばれる、Fig. 4(b) のような不安定な軌道を描く。

3.2 回路シミュレーション

i) VDP 回路のシミュレーション VDP は、Fig.5 のような特性を持つトンネルダイオードを用いた回路によって表される。ここでは、実際の回路上でモデルの挙動を調べるため、回路シミュレーター (LTspice) 上で触角葉モデルを作成する。使用しているトンネルダイオードのモデルは 1N3858 である。まずはじめに、Fig.6 (a) のように VDP を作成し、その挙動を調べたところ、Fig.6 (b) のような振動が確認された。以降はこの回路を VDP として用いる。

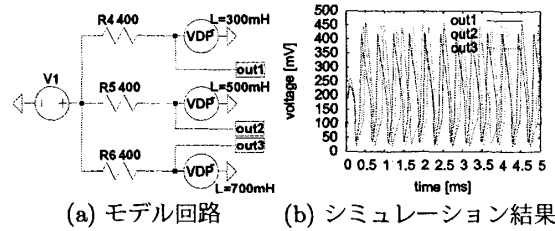


Figure 7: 触角葉モデルの挙動 (局所結合なし)

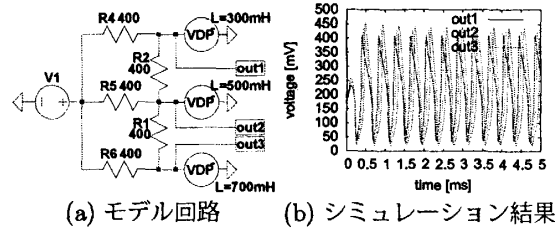


Figure 8: 触角葉モデルの挙動 (局所結合あり)

ii) 触角葉回路のシミュレーション 触角葉のモデルを電気回路で作成し、その挙動をシミュレーションする。Fig. 3(a) のように振動子間の局所結合を持たない回路を作ると、Fig. 7(a) のようになる。Fig. 3(a) の O_1, O_2, O_3 の振動子を 300~700[mH] のインダクタンスを持つ VDP で作成し、そこに刺激に対応する外部振動 (V1) を加える。V1 として、 O_1 と O_2 の中間に当たる 2.5[kHz] の正弦波を加えると、Fig.7(b) のように、 O_1 と O_2 が同期し、 O_3 のみが独立して振動する。またこのとき、1.7[kHz] 以下の振動を加えると O_2 と O_3 のみが同期する。一方で、振動子間に Fig.3(b) のような振動子間の局所結合を持つシステムに対して、同じ入力を加えた場合を考える。振動子間に抵抗による局所結合を作成し (Fig.8(a)), 先ほどと同じように 2.5[kHz] の正弦波を加えると、Fig.8(b) のようにすべての振動子が同期する。またこのことは 1.7[kHz] の振動においても同様となる。

以上より、局所結合によって刺激に対する応答の変化が確認され、触角葉の NO 修飾機能と類似な回路が実現できた。

4. 攻撃・回避行動を切り替えるロボット

Fig. 7, 8 のような振動子による回路を用いて、コオロギロボットを作成する。

ブライテンベルグピークルと呼ばれる、Fig. 9 のようなシンプルなモデルは、それぞれが攻撃的・逃走指向の振る舞いをする事が知られている¹²⁾¹³⁾。このモデルでは、センサ入力に応じて反対側のモータを動かすと、入力された方向に向かっていき (Fig. 9(a); 攻撃的)、センサと同方向のモータを動かすと、センシングされた対象から遠ざかるようにする (Fig. 9(b); 逃走指向)。

このような単純なロボットに振動子回路を応用し、内部状態によって攻撃・逃走が切り替わるようなロボットを考える。Fig. 10 のようにセンサ-モータ間に触角葉モデルと同様の振動子回路を作成する。図の円が振動子を表してお

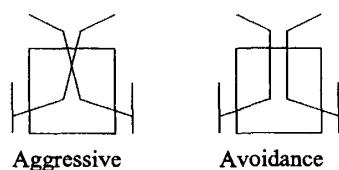


Figure 9: 攻撃・逃走行動を有するロボット

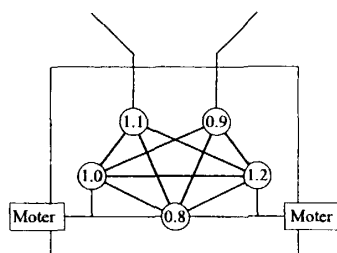


Figure 10: ロボットモデル

り、その数字は固有振動数を表す。このロボットはショートカット（赤線）の無いときには入力を受けた触角と反対方向のモータが動き、ショートカットが加わると、1.0, 1.2, 0.8 であったそれぞれの振動子の振動数がすべて 1.0 になり、触角のどちらに刺激をうけても前へと逃走する (Table 3)。このようにして、構造の切り替えによって振動子の同期関係が変わり、攻撃・逃走を切り替えるようなロボットが実現可能である。

Table 3: ショートカットと行動

ショートカット	触角入力	行動	状態
なし	左入力	右方移動	攻撃
	右入力	左方移動	攻撃
あり	左入力	前方移動	逃走
	右入力	前方移動	逃走

5. まとめ

本研究では、昆虫の嗅覚情報の流れに着目することにより、信号の流れを中心としたモデルを作成し、さらに振動子によって嗅覚処理機能の工学的再現を試みた。またコオロギの経験記憶の生成における神経構造の切り替えの効果と同じように、各振動子の出力が接続構造に応じて切り替わることを示し、それによって構造が機能生成において果たす役割について考察した。さらにできあがったモデルを電子回路を用いてシミュレーションし、単純なロボットモデルに実装することによって行動切り替えを実現する方法を提案した。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（特定領域研究 17075007）及び（若手研究 (A)17680016）の補助により行われた。

References

- [1] S.H.Strogatz. Exploring complex networks. Nature, Vol. 410, pp. 268.276, 2001.
- [2] C.Y.Huang, C.T.Sun, J.L.Hsieh, and H.Lin. Simulating sars: Small-world epidemiological modeling and public health policy assessments. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol. 7, No. 4, 2004.
- [3] M.Small, P.Shi, and C.K.Tse. Plausible models for propagation of the sars virus. IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E87-A, No. 9, pp. 2379.2386, 2004.
- [4] L.F.Lago-Fernandez, R.Huerta, F.Corbacho, and J.A.Siguenza. Fast response and temporal coherent oscillations in small-world networks. Physical Review Letters, Vol. 84, No. 12, pp. 2758.2761, 2000.
- [5] D.J.Watts. Small Worlds. Princeton Studies in Complexity, 1999.
- [6] 青沼仁志. 昆虫の行動決定にかかわる神経機構. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 6.10, Jan. 2005.
- [7] 船戸徹郎, 奈良維仁, 柴松良太, 倉林大輔. 構造的性質に基づく振動子網の挙動制御. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 2005.
- [8] 船戸徹郎, 倉林大輔, 奈良維仁. 振動子網制御のための構造的性質の解析. 第 18 回自律分散システム・シンポジウム, 2006.
- [9] M.Stopfer, M.Wehr, K.Macleod, and G.Laurent. Neural dynamics, oscillatory synchronisation, and odour codes. In B.S.Hansson, editor, Insect Olfaction, chapter 6, pp. 163.180.Springer, 1999.
- [10] G.Laurent, M.Wehr, and H.Davidowitz. Temporal representations of odors in an olfactory network. The Journal of Neuroscience, Vol. 16, No. 12, pp. 3837.3847, 1996.
- [11] R.Okada, M.Sakura, and M.Mizunami. Distribution of dendrites of descending neurons and its implications for the basic organization of the cockroach brain. Ther Journal of Comparative Neurology, Vol. 458, pp. 158.174, 2003.
- [12] V.Braitenberg. Vehicles :Experiments in synthetic psychology. MIT press, 1984.
- [13] R.Pfeifer. Understanding Intel ligence. Bradford Books, 1999.