

相互作用効果ダイナミクスを持つ行動切り替えモデルによる マルチ・エージェント掃引作業*

川端 邦明^{*1}, 藤井 喬^{*2}, 鈴木 剛^{*3}
青沼 仁志^{*4}, 太田 順^{*5}, 浅間 一^{*6}

Sweeping Task of Multiple Mobile Agents by Utilizing Behavior Selection Model with Interaction-Based Efficacy Dynamics

Kuniaki KAWABATA^{*1}, Takashi FUJII, Tsuyoshi SUZUKI
Hitoshi AONUMA, Jun OTA and Hajime ASAMA

^{*1} RIKEN-XJTU Joint Research Team, RIKEN
2-1, Hirosawa, Wako, Saitama, Japan, 351-0198

This paper discusses what is given to control of multi-agent system with dynamic behavior selection model which we already proposed. Cricket shows adaptive behavior modification in both of individual and group level based on individual interactions. Principle of such ability is useful to control multi-agent system by bottom-up approach. In this paper, we compare our proposed model with other behavior selection models in sweeping task and discuss its effects from computer simulation results.

Key Words : Adaptive Behavior Selection Model, Interaction, Multi-Agent System, Sweeping Task, Mobiligence

1. は じ め に

マルチ・エージェントシステムに期待されることは、単一エージェントでは困難な機能の実現や作業効率の向上である。これを実現するものとして、自律分散システム⁽¹⁾や創発システム⁽²⁾といったシステム論に関する研究分野がある。これらでは、サブシステム間の相互作用に基づいて秩序ある行動を発現させるシステムの設計論について研究が行われており、その一つの目標は生物がしめすようなロバストかつ柔軟なシステムを実現することである。また、身体・脳・環境間の相互作用により運動機能が発現されるという仮設のもと、生物の適応機能を構成論的に理解する、移動知という研究分野も提唱されている⁽³⁾。

移動知研究においては、社会適応的な行動切り替えを実現する情報処理メカニズムについての研究も進められており⁽⁴⁾、我々はクロコオロギを対象に神経生理学および行動学の知見に仮設を加えることで総合化するアプローチ：Synthetic neuroethology によって、行動切り替えモデルの構築を行ってきた。この結果、内部状態ダイナミクスおよび相互作用頻度による感覚入力感受性調節ダイナミクスを取り入れた行動切り替えモデルにより、個体行動および群行動レベルにみられる行動の傾向変容について再現可能であることが示された⁽⁵⁾。移動知研究では、生物の適応機能を構成論的に理解すると同時に、人工物の適応性に関する設計原理の抽出が目的である。つまり、構築されたモデルが適応的な意味においてどのような効果、特性をもたらすかについて検証することは人工物の設計論の観点において意義深いといえる。

* 原稿受付 2012年6月17日

^{*1} 正員, (独)理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

^{*2} NSSLC サービス(株) (〒104-8280 東京都中央区新川 2-20-15)

^{*3} 正員, 東京電機大学 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5)

^{*4} 北海道大学電子科学研究所 (〒060-0812 北海道札幌市北区北 12 条西 7)

^{*5} 正員, 東京大学人工物工学研究センター (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

^{*6} 正員, フェロー, 東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: kuniakik@riken.jp



そこで本稿では、我々が構築したクロコオロギを規範とする相互作用効果のダイナミクスを考慮にいたした行動切り替えモデル⁽⁵⁾が、マルチ・エージェント系の作業に与える効果について検証する。具体的には、マルチ・エージェントによる掃引作業を作業例として、異なる3つの行動選択モデルに基づいた計算機シミュレーションによって比較を行い、相互作用効果ダイナミクスを考慮に入れた行動切り替えモデルのもたらす効果について検証、報告を行う。

2. クロコオロギの行動傾向変容と行動切り替えモデル

オスのクロコオロギは他のオスと遭遇し、触角によりフェロモンを感受すると闘争行動を発現することが知られ、負け個体は闘争直後に他個体に対し逃避行動をしめすことが報告⁽⁶⁾されており、経験に基づいて行動切り替え傾向が可塑的に変化する。さらに、クロコオロギは個体密度に応じて群行動の傾向が変化することも報告⁽⁷⁾されており、このことは環境密度の変化に伴って群行動の傾向が調節されることを示している(図1)。このような個体・群レベル双方のクロコオロギの適応的な行動傾向変容を対象として、これまでに我々は個体・群レベルの双方の適応行動を矛盾なく説明可能な相互作用効果のダイナミクスを取り入れた動的行動切り替えモデル(図2)の構築を行った⁽⁵⁾。詳細は文献⁽⁵⁾にゆずるが、このモデルでは、オクトパミンを仮定した内部状態ダイナミクスと触角情報からの伝達効率を仮定した感覚入力感受性に関するダイナミクスが内在している。内部状態は他者との闘争行動時間とその結果(勝ち負け)に応じて変動し、他者との接触頻度によって感覚入力感受性の値が変動する。この変動とは、接触頻度が高いと感覚入力感受性値が下がり、頻度が低い状態がつづく徐々に回復していく、というものである。構築したモデルでは、他者と遭遇した後に、感覚入力感受性値が高い場合は内部状態によって駆動して闘争行動もしくは逃避行動を選択し、感覚入力感受性値が低い場合は無反応を選択する。このように、提案したモデルでは内部状態と相互作用の頻度により動的に調節される状態によって行動が切り替えられるものである。これまでに、計算機シミュレーションでの検証により、構築された行動切り替えモデルにより、クロコオロギが示すような環境密度に対する行動傾向変容を自己組織的に発現することが示されている。このことから、提案したモデルがマルチ・エージェント系のボトムアップ型制御機構に適用した際に、どのような効果をもたらすかに

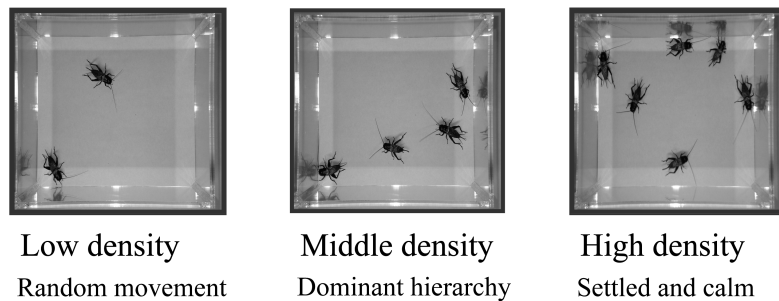


Fig. 1 Behavioral tendency to population density

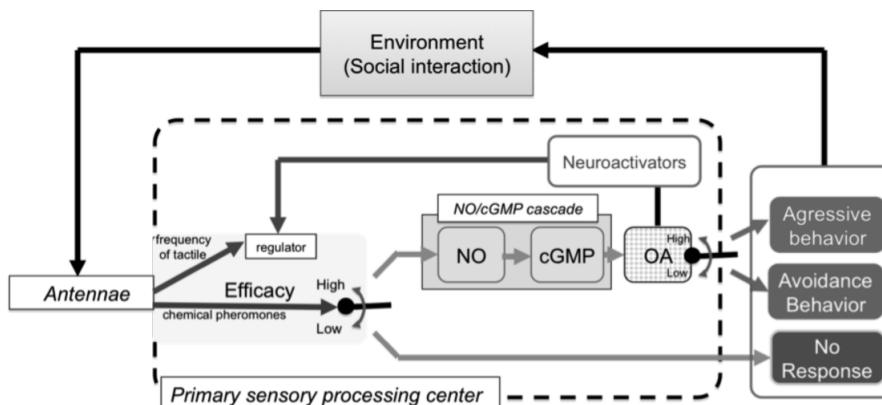


Fig. 2 Behavior selection model based on biological knowledge

ついて明らかにすることは、相互作用の設計論の観点から興味深いことである。次節において、我々が構築した行動切り替えモデルがもたらす効果について検証する。

3. 掃引作業への適用

環境に対して適応的に行動傾向を変容するという性質は、マルチ・エージェント系における典型的な課題である役割分担の自己組織化に適したものであると考えられる。そこで、このようなマルチ・エージェント系の作業の典型例の1つである掃引作業を例に、前述の行動切り替えモデルがもたらす効果について検証する。

3.1 設定

相互作用効果のダイナミクスによる効果を検証するために、以下のような行動切り替えモデルを用意し、それぞれの性能について比較することとした。

- 行動切り替えモデル1：他者をセンシング領域内（後述）で検知した（他者と遭遇）場合、内部状態と相互作用効果（感覚入力感受性、ここでは他者との遭遇頻度）に基づいた提案モデルによる行動切り替え
- 行動切り替えモデル2：他者をセンシング領域内で検知した場合、ランダムに進行方向を変更する反射型の行動切り替え
- 行動切り替えモデル3：モデル1から相互作用効果（他者との遭遇頻度）を取り除いたモデルによる行動切り替え

つまりこれらは、内部状態および遭遇頻度効果ダイナミクスによる行動切り替え（モデル1）、ランダム行動切り替え（モデル2）、内部状態ダイナミクスのみによる行動切り替え（モデル3）である。また、モデル1とモデル3の移動方向の選択は、他者との遭遇時の位置関係に依存（モデルの基準により逃避を選択した場合は遭遇方向とは逆方向に移動を意味する）している。これらの3つモデル間を用いて比較を行うことにより、相互作用効果（本作業では、遭遇頻度）による効果について評価することができると考えられる。

3つのモデルを比較するために、計算機シミュレーション実験の条件については以下のように設定した。

- 1セグメントを 10×10 [pixel] で表現し、四辺を障害物で囲まれている正方形環境
- 10×10 セグメント、 20×20 セグメント、 40×40 セグメントの3種類の環境での作業を比較
- エージェントはサイズが1セグメント（ 10×10 [pixel]）、近傍8セグメントにセンシング領域を持ち、1ステップに1セグメント分移動可能
- 投入するエージェントの数は4とし、内部状態の初期条件は全て同一、初期位置・移動方向はランダム生成、環境内を掃引し終えた時点で作業終了

さらに、各モデル間での比較について公平性を確保するために、他者との遭遇から行動切り替えまでが1ステップ内で実行されることとした。これらの条件をもとに掃引作業の計算機シミュレーションを実施し、相互に比較を行うこととし、各モデルおよび各環境サイズでそれぞれ50試行分を行い、掃引作業に要したステップ数の平均値を用いた。

3.2 計算機シミュレーション結果

掃引作業における評価として、まず各環境にそれぞれの行動切り替えモデルを適用した場合の掃引を完了する時間効率について比較を行った。

ここで図3左は、モデル2の平均掃引完了ステップ数（薄灰色）を標準(1.0)とした際の、モデル1（白色）とモデル3（濃灰色）の平均掃引完了ステップ数の比率を示している。結果より、モデル1の達成率はモデル2と比較して各環境においてそれぞれ掃引ステップ数が減少し、時間効率が良くなっていることがわかった。また、モデル3の場合は、モデル2と比べて掃引完了ステップ数が同等か、もしくは多くなってしまい時間効率が悪い場合があることがわかった。また、モデル1は低密度環境において特に効率的に作業が行われたことがわかる。

つづいて、掃引作業を行ったエージェント全体の移動効率について比較を行った。移動効率については単位ステッ

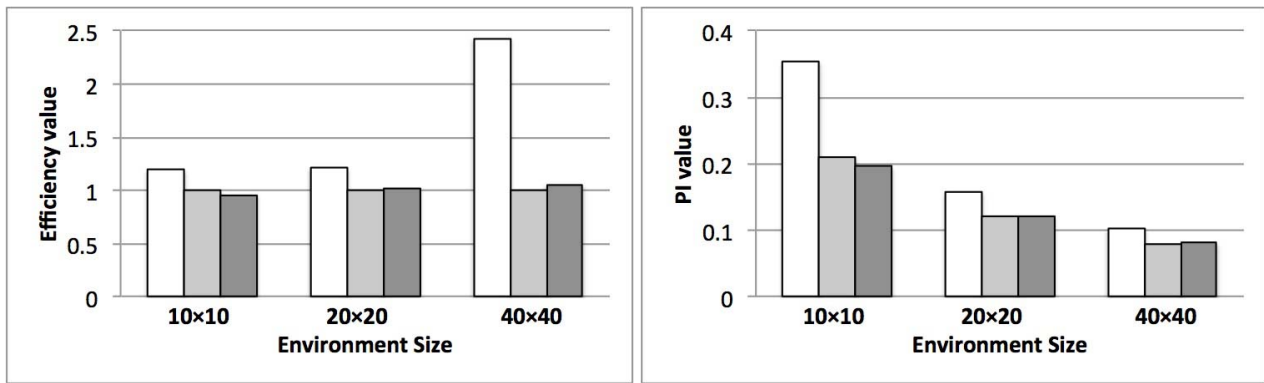


Fig. 3 Computer simulation results of sweeping task: time efficiency(left) and motion efficiency(right)

ブあたりの平均移動距離を評価対象とし，式(1)による関数を用いて計算を行った。

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{nT} \quad (1)$$

ここで， s_i は各試行において各エージェントが探索した総移動量を， T は掃引終了まで要したステップ数を， n は投入したエージェント数（ここでは， $n=4$ ）を示している。図3右より，モデル1の各エージェントの移動効率（白色）はモデル2の移動効率（薄灰色）よりも全体として高い水準を維持していることが分かる。一方で，モデル3（濃灰色）に関しては，モデル2の移動効率と同等もしくは，やや下回ることもあることがわかった。

このように，掃引を完了する平均ステップ数の比較結果およびエージェント全体の移動効率に関する比較結果より，内部状態および遭遇頻度を考慮にいれて行動を切り替える方が効率的な作業が行われる，ということが示された。

このことは，マルチエージェント間の相互作用を活用した行動切り替え系の設計を考える場合には，相互作用による効果（= 触角からの感覚入力感受性，他者との遭遇頻度により調整）を取り入れることで，作業効率の改善に有効にはたらくことが示唆されていると考えることができる。特にこれらの結果から，作業領域が広い場合の時間効率と作業領域が狭い場合の移動効率において，効果を発揮することが示された。

4. お わ り に

本稿では，我々が構築したクロコオロギを規範とした相互作用効果を考慮にいれた行動切り替えモデルがマルチ・エージェント系の掃引作業に及ぼす効果について検証を行った，

具体的には，掃引作業を例として計算機シミュレーションにより，内部状態および相互作用効果ダイナミクスによる行動切り替えモデルを，反射型行動切り替えモデルや相互作用効果を考慮にいれない行動切り替えモデルとの結果について比較を行った。

計算機シミュレーション結果から，相互作用効果ダイナミクスを持つ行動切り替えモデルは，他のモデルを用いた場合に比べて作業完了時間，移動効率において効率化されることが示された。このことから，他者との相互作用に関する効果を行動切り替え則にとり入れることで掃引作業が効率化されることがわかった。

今後は，今回の報告から得られた知見に基づいて，群ロボット等の相互作用に基づいた実世界かつ実時間での適応的行動切り替え機構の設計指針等に活用していく。

謝 辞

本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現-移動知の構成論的理解-」および，科研費（課題番号：23650102，23300113）の支援により行われた。ここに謹んで謝意を表す。

文 献

- (1) 伊藤正美, "自律分散システム研究の課題と将来", 計測と制御, Vol.32, No. 10 (1993), pp.789-796.
 - (2) 北村新三, 喜多一, "創発システム", 計測と制御, Vol. 40, No. 1, (2001), pp. 94-99 .
 - (3) 高草木薫, 浅間一, "移動知: 行動からの知能理解-構成論的観点と生物学的観点から". 計測と制御, Vol. 44, No. 9 (2005), pp. 580-589.
 - (4) Aonuma, H. , and Kanzaki, R., " Systematic Understanding of Neuronal Mechanisms for Adaptive Behavior in Changing Environment, " *Proceedings of the 1st Int. Symposium on Mobiligence*, (2005), pp. 63-66.
 - (5) Kawabata, K. , Fujii, T. , Aonuma, H. , Suzuki, T. , Ashikaga, M. , Ota, J. , and Asama, H., " A Neuromodulation Model of Behavior Selection in the Fighting Behavior of Male Crickets ", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, Issues 5, (2012), pp.707-713.
 - (6) Sakura, M., Yoritsune, A., and Aonuma, H., " Fighting experiences modulate aggressive and avoidance behaviors in crickets against male cuticular substances. ", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Mobiligence*, pp. 243-246, 2007 .
 - (7) Ashikaga, M. , Sakura, M. , Kikuchi, M. , Hiraguchi, T. , Chiba, R. , Aonuma, H. and Ota, J. , "Establishment of social status without individual discrimination in the cricket", *Advanced Robotics*, Vol.23, No.5, pp.563-578, 2009.
-