

自己組織型ネットワーク制御のための反応閾値モデルの特性分析

Characteristic Evaluation of Response Threshold Model for Self-organizing Network Control

岩井 卓也 若宮 直紀 村田 正幸
Takuya Iwai Naoki Wakamiya Masayuki Murata

大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan

1 まえがき

高い拡張性、適応性、耐故障性を有する自己組織型ネットワーク制御の研究において、生物の数理モデルを応用した制御技術が数多く提案されているが [1]、その多くにおいて、生物数理モデルの最適性、安定性などが検証されておらず、また、パラメータ設定の根拠や制御の適用範囲が曖昧である。そこで、本稿では、生物の自己組織的な振る舞いに着想を得た新しいネットワークアーキテクチャを実現するためには、ネットワーク制御の観点から生物数理モデルの特性を分析し、設計に活かすことが重要であることから、その一例として、社会性昆虫の自己組織的な役割分担の数理モデルである反応閾値モデル [2] を対象として、特性分析を行った結果を示す。

2 分析モデル

反応閾値モデルでは、それぞれの個体が仕事の刺激に基づいて仕事に従事するか否かを自律分散的に決定する。時刻 t における群れの大きさ $m(t) (> 0)$ とワーカー数 $n(t) (\geq 0)$ 、仕事の刺激 $s(t) (\geq 0)$ 、刺激の増加係数 $\delta(t) (1 \geq \delta(t) \geq 0)$ により、時刻 $t+1$ における刺激 $s(t+1) = s(t) + \delta(t) - n(t)/m(t)$ が与えられる。また、時刻 $t+1$ における個体 i の状態 $X_i(t+1) \in \{0, 1\}$ は以下の遷移確率で決定される。なお、刺激 $s(t)$ を受け取れなかった個体は、刺激 $s(t) = s(t-1) \times 0.8$ を用いる。

$$\begin{cases} P(X_i(t+1) = 0 | X_i(t) = 1) = p \\ P(X_i(t+1) = 1 | X_i(t) = 1) = 1 - p \\ P(X_i(t+1) = 1 | X_i(t) = 0) = \frac{s^2(t)}{s^2(t) + \theta_i^2(t)} \\ P(X_i(t+1) = 0 | X_i(t) = 0) = 1 - \frac{s^2(t)}{s^2(t) + \theta_i^2(t)} \end{cases}$$

$X_i = 1$ はワーカー、 $X_i = 0$ はノン・ワーカーを表し、係数 $p (1 > p > 0)$ は確率である。また、時刻 $t+1$ における閾値 $\theta_i(t+1)$ は、 $X_i(t+1) = 1$ の場合は $\theta_i(t) - \xi$ 、 $X_i(t+1) = 0$ では $\theta_i(t) + \varphi$ となる。 $\xi (> 0)$ と $\varphi (> 0)$ は係数である。この強化学習により、群れはワーカーとノン・ワーカーに分化する。

3 ネットワークの特性を考慮した特性分析

最適性を、シミュレーション終了時点から過去 1,000 単位時間のワーカー数の平均値の目標値に対する誤差の小ささ、安定性を、同期間のワーカー数の最大値と最小値の差の小ささ、収束性を、誤差の期待値が目標値の 10% 以下に留まり始める時間の短さとそれぞれ定義し、パラメータ設定や情報欠損の影響を分析する。

確率 p を 0.001、閾値の最大値 θ_{max} を 1,000、最小値 θ_{min} を 1、係数 ξ を 10、係数 φ を 1 からそれぞれ増加させた結果を表 1 に示す。なお、ワーカー数の目標値を 200、係数 $\delta(t)$ を 0.2、閾値の初期値を $0.5 \times \theta_{max}$ とした。

表中の“ \rightarrow ”はパラメータの増加に影響されにくいことを、“ \nearrow ”は向上することを、“ \searrow ”は低下することをそれぞれ表している。表より、ワーカー数はパラメータに

表 1 パラメータの影響

パラメータ	最適性	安定性	収束性
ノン・ワーカーになる確率 p	\rightarrow	\rightarrow	\nearrow
閾値の最大値 θ_{max}	\rightarrow	\nearrow	\searrow
閾値の減少係数 ξ	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
閾値の増加係数 φ	\rightarrow	\searrow	\searrow
群れの大きさ $m(t) = M$	\rightarrow	\nearrow	\searrow

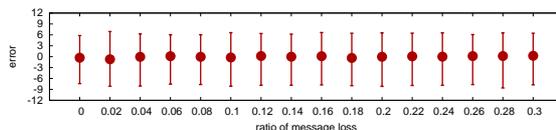


図 1 欠損率と最適性、安定性

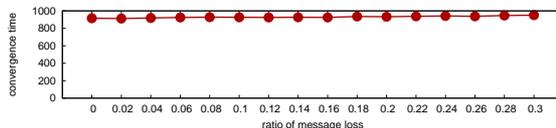


図 2 欠損率と収束性

よる影響を受けにくく、反応閾値モデルを応用したネットワーク制御の最適性がパラメータ設定に対してロバストであると言える。一方で、安定性および収束性はパラメータの影響を受けやすい。例えば、群れの拡大、すなわちノード数の増加による収束性の低下に対しては、他のパラメータの調整により改善できる可能性がある。

つぎに、情報の欠損が確率 l で起こり、刺激と状態の算出に誤差が生じる場合の結果を示す。図 1 では、ワーカー数の誤差について、最適性を点で、安定性を棒で、図 2 では収束性を、それぞれ欠損率 l に対して示している。図より、いずれの尺度も情報欠損の影響を受けにくいことから、反応閾値モデルはメッセージ損失の生じるネットワーク制御に対する親和性が高いと考えられる。

4 まとめ

本稿では、シミュレーションにより、ネットワークの特性を考慮した反応閾値モデルの特性を分析した。今後は、非線型システム論などによる理論的な特性解析に取り組み、有効なパラメータ領域などについて議論する。

謝辞

本研究は、独立行政法人情報通信機構国際共同研究助成制度および独立行政法人日本学術振興会特別研究員奨励費によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] F. Dressler and O. B. Akan, “A survey on bio-inspired networking,” *Computer Networks*, vol. 54, pp. 881–900, Apr. 2010.
- [2] E. Bonabeau, A. Sobkowski, G. Theraulaz, and J. L. Deneubourg, “Adaptive task allocation inspired by a model of division of labor in social insects,” in *Proceedings of BCE*, pp. 36–45, Jan. 1997.