

確率的経路制御に向けたアトラクタ選択モデルの拡張と適応的アトラクタ更新モデル

齋藤 慶彦^{†a)} 寺前順之介^{†b)} 若宮 直紀^{†c)}

Adaptive attractor renewal model for hop-by-hop multipath routing

Yoshihiko SAITOH^{†a)}, Jun-nosuke TERAMAE^{†b)}, and Naoki WAKAMIYA^{†c)}

あらまし 全体最適化を前提とした従来の経路制御手法では、ネットワークの大規模化・複雑化に伴い、経路の構築、更新、障害回復等の制御負荷の著しい増大など、様々な問題に直面すると考えられている。これらの問題を解決するために、自律分散型の経路制御手法が研究され始めており、生物が環境適応を行うメカニズムに基づくアトラクタ選択モデルを用いた経路制御手法が提案されている。この手法は、制御負荷の増大を抑え、障害や環境変動に対する高い適応性を有すると考えられているが、ネットワーク全体の状況ではなく、現在使用中の経路状況のみに応じた制御しか行えないため、例えば使用経路以外の経路の通信状況の改善には対応できず、ネットワークの十分な効率的利用ができないという問題があった。本研究ではアトラクタ選択モデルを確率的経路制御に拡張することでこの問題を解決する。確率を通信状況に合わせて適応的に変化させるために、経路情報に応じてアトラクタの位置を更新する新規なアトラクタ更新モデルを提案する。通信の平均遅延時間を評価指標としたネットワークシミュレーションを行い、アトラクタ更新モデルの有効性を示す。

キーワード コンピュータネットワーク、アトラクタ選択モデル、確率的経路選択、アトラクタ更新モデル

1. はじめに

近年の通信ネットワークの急速な大規模化に伴い、既存の経路制御手法の限界が指摘されはじめた [1]。具体的には、経路構築時や故障発生時に必要な計算コストの増大、経路情報更新時の制御オーバーヘッドの増大がもたらす混雑時の利用効率低下などが挙げられる。これらの問題の根幹には、従来の経路制御手法が、全体最適化を前提としているため、最適な経路制御のためにネットワーク全体のトポロジを把握して、各ノードから全宛先ノードまでの最短経路を全て計算している点にある。

この問題を解決するために、全体最適化を用いず、自律分散的な制御によってネットワークの効率的利用を目指す経路制御手法が研究され始めており、その中

で、自律分散的に有効な解をみつけだす生物システムのメカニズムを通信ネットワーク制御に利用することが考えられてきた [2]。生物システムは、環境変化に対する頑強性と高い適応性をもち、局所情報に基づく自律分散な制御を行う。また分散的に動作することで高い拡張性も保持していることが多い。

アトラクタ選択モデル [3] はこのような生物システムの挙動を表す数理モデルの一つであり、具体的には、大腸菌が周囲の栄養環境に合わせて不足した栄養素を適応的に生成する仕組みを表したものである。このモデルは二種類の遺伝子活性を表す二つの状態変数によって表され、各遺伝子の排他的な発現に対応する二つの安定状態 (アトラクタ) を持つ。また、細胞の活性度を表すアクティビティと呼ばれる変数を持つ。

遺伝子活性を表す状態変数が、二つのアトラクタのどちらに属するかに応じて遺伝子の活性が変化し、大腸菌が生成する栄養素が変更される。アトラクタ間の遷移は細胞の活性を表すアクティビティによって制御されており、アクティビティの値が大きいときは現在のアトラクタで安定している一方、アクティビティが小さければ、遺伝子発現のゆらぎの影響を受けラン

[†] 〒 565-0871 大阪大学大学院情報科学研究科, 大阪府吹田市山田丘 1-5

Graduate School of Information Science and Technology Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka 565-0871 Japan

a) E-mail: y-saitoh@ist.osaka-u.ac.jp

b) E-mail: teramae@ist.osaka-u.ac.jp

c) E-mail: wakamiya@ist.osaka-u.ac.jp

ダムウォークによって別のアトラクタへの探索が行われる。

アトラクタ選択モデルを用いた経路制御手法では、一般に二つ以上の経路を管理するために元のアトラクタ選択モデルが M 個の状態変数と M 個のアトラクタを持つように拡張される。ここで M は保持すべき経路数または次ホップ数である [4], [5], [6], [7]。各アトラクタを経路または次ホップに対応させて、現在の状態変数が最大の経路、または次ホップを使用する経路制御が提案されている。適応的な経路制御を実現するために、アクティビティを使用経路の通信状況に対応させ、具体的には通信遅延の増大など経路状況が悪化した場合は、アクティビティが減少し、状態変数のランダムウォークによって別のアトラクタ、すなわち別の経路を探索するような制御が行われる。

アトラクタ選択モデルを用いた経路制御手法では、状態変数が最大の経路のみを使用し、その経路状況のみを取得することで、全体最適化に必要な制御オーバーヘッドを抑えて、大規模環境に適用可能な拡張性の高い経路制御が実現できる。しかし、安定状態時に他の経路状況が把握できないため、他の経路状況が改善しても対応できないという問題がある。

この問題を解決するために、ゆらぎを意図的に大きくすることで安定状態でも他経路を能動的に探索する一方、探索の結果得られた経路状況が現在の経路よりも悪ければ元の経路に引戻しを行う能動的探索手法が提案されている [7]。

本研究では、先行研究とは全く異なるアプローチによってこの問題解決を試みる。具体的には、複数の経路を確率的に並列利用する手法を提案する。複数経路の経路状況には一般に差があるため、経路選択確率を状態変数の値に応じて重み付ける。ただし、アトラクタ選択モデルはアトラクタの位置が固定であるため経路状況に応じた柔軟な確率調整は行えない。この課題を克服するために、アトラクタ選択モデルの発展方程式をアトラクタの位置自体を更新するモデル（アトラクタ更新モデル）に拡張し、このモデルを用いた経路制御手法を提案する。ネットワークシミュレーションにより、アトラクタ選択モデルが対応できない他の経路状況の改善について、提案モデルが、適切な経路選択を実現することを示す。

2. アトラクタ選択モデルと経路制御

2.1 アトラクタ選択モデルの概要

アトラクタ選択モデル [3] は、大腸菌が周囲の栄養環境に合わせて二種類の栄養素の生成を促進、抑制する仕組みを表す非線形数理モデルである。文献 [3] では、遺伝子操作が施された細胞を用いた実験で周囲に欠乏している栄養素を生成する遺伝子の発現が活性化することが示されている。

二種類の栄養素をそれぞれ栄養素 1、栄養素 2 とし、栄養素を生成する遺伝子の発現量を m_1 、 m_2 とおくと、遺伝子発現量の時間変化は以下の式で与えられる。

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{S(\alpha)}{1 + m_2^2} - D(\alpha)m_1 + \eta_1 \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{S(\alpha)}{1 + m_1^2} - D(\alpha)m_2 + \eta_2 \quad (2)$$

$S(\alpha)$ と $D(\alpha)$ は遺伝子の合成と減衰を表す関数で、 $S(\alpha) = \frac{6\alpha}{2+\alpha}$ 、 $D(\alpha) = \alpha$ で与えられる。 α は細胞の活性度を表す実数値 ($0 \leq \alpha \leq 1$) である。 η_1 、 η_2 は遺伝子発現のゆらぎを表すノイズ項で、白色雑音が用いられる。

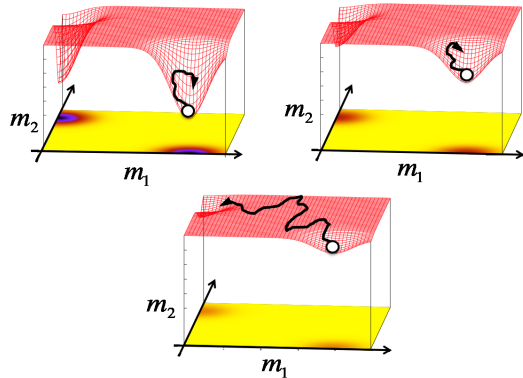


図1 アトラクタ選択モデルの概念図: ポテンシャルの変化

図1、はそれぞれアクティビティの値が大きい場合、中間の値をとる場合、小さい場合のアトラクタ選択モデルの概念図を表している。栄養素が十分な場合はアクティビティが大きくなり、アトラクタに該当するポテンシャルが深くなって遺伝子発現のゆらぎによるアトラクタの脱出が起らず、その状態で安定する。一方、不足している栄養素がある場合はポテンシャルが浅くなり、遺伝子発現のゆらぎによるアトラクタの脱出が起こる。アトラクタ脱出後は、ゆらぎによるラ

ンダムウォークで平坦なポテンシャルを移動し、適切なアトラクタに近づけばアクティビティが増加し、そのアトラクタのポテンシャルが深くなって安定する。

2.2 経路制御への応用

文献 [4], [5], [6], [7] では、アトラクタ選択モデルを二次元から M 次元に拡張し、複数の経路、次ホップをアトラクタに対応させて経路制御への応用を提案している。

文献 [6] の手法では有線ネットワークのホップバイホップルーティングにアトラクタ選択モデルを応用している。各ノードは、経路情報として宛先アドレス、隣接ノードアドレス ($1, \dots, M$)、宛先ノード d 毎に状態変数ベクトル $\vec{m}_d = (m_1, \dots, m_M)$ 、アクティビティ $\alpha_d (0 \leq \alpha \leq 1)$ 及びフィードバックウィンドウを保持している。次ホップの良さを通信の片道遅延とし、アクティビティに反映させることで、通信遅延が最短となる次ホップ (アトラクタ) で安定させ、効率的な通信を行うことを目標としている。各ノードは宛先ノードとその中継ノード間の片道遅延 (w_d) を制御メッセージの送受信 (制御周期 T 毎に送信) で計測し、フィードバックウィンドウに保管後、アクティビティを以下の式で計算している。

$$\alpha'_d(h) = \frac{\min_{(0 \leq k \leq W-1)} [w_d(h-k)]}{w_d(h)} \quad (3)$$

$$\alpha_d(h) = \begin{cases} \alpha'_d(h), & \text{if } \alpha_d(h-1) \leq \alpha'_d(h) \\ c\alpha'_d(h) + (1-c)\alpha_d(h-1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 d は宛先アドレスを表し、 h は制御周期の回数を表している。 W はフィードバックウィンドウで保管する計測遅延の個数を表している。すなわち、アクティビティは過去 $W-1$ 回計測した片道遅延の最小値と比べ、現在計測した片道遅延がどれだけ小さいかで求められる。なお、中継ノードの故障や途中経路の深層な混雑で片道遅延が計測できない場合は、定数 D ($0 \leq D \leq 1$) を定め、 $\alpha'_d(h) = \alpha(h-1) * D$ でアクティビティを更新する。また、選択中の次ホップノードが故障した場合は、ただちに $\alpha(h) = 0$ とする。

アクティビティ更新後、以下の式で各状態変数 m_i を更新する。更新後、状態変数が最大のものに対応する隣接ノードが次の制御周期までの次ホップとなる。

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{s(\alpha_d)}{1 + m_{max}^2 - m_i^2} - d(\alpha_d)m_i + \eta_i \quad (5)$$

ここで、 $m_{max} = \max(m_1, \dots, m_M)$,

$s(\alpha) = \alpha(\beta\alpha^\gamma + \phi^*)$, $d(\alpha) = \alpha$, $\phi^* = \frac{1}{\sqrt{2}}$ で、 η_i はノイズ項である。この状態変数の評価式を用いると、ある一つの状態変数が最大値をとり、その他の状態変数は、0 近傍の値をとるようになる。ただし 0 未満の値をとる場合は 0 となるように調整する。隣接ノードが故障した場合は直ちにそのアドレスに対応する状態変数を経路情報のテーブルから除外する。さらに故障した隣接ノードが次ホップだった場合は、他の全ての状態変数を 0 で初期化する。

2.3 経路制御へ応用する場合の問題点

参考文献 [6] の手法では、使用経路に限り片道遅延を計測することに加えてアクティビティが 1 近傍の値をとり続ける、すなわち使用経路の片道遅延が悪化しない限りは状態変数が変化せず、経路変更を試みないので、使用経路以外の経路状況の改善 (混雑していたトラヒックの減少等) に対応できないため、効率の良い通信ができないという問題点がある。この問題点を解決するには、使用経路以外の経路に関しても遅延情報を取得し、計測結果に応じて使用経路を変更する必要がある。

この問題に対する先行研究として、文献 [7] では、経路の使用時間に応じてアトラクタ選択モデルのゆらぎを大きくし、能動的に他の経路の探索を行い、探索の結果現在の経路よりも遅延が短ければ経路を変更し、悪ければ前の経路の記憶による経路の引き戻しを行う手法が提案されている。

3. 確率的経路制御に向けたアトラクタ選択モデルの拡張

本稿ではこの問題に対し、複数経路を確率的に並列利用して得られた遅延情報に応じ、各次ホップの選択確率を適応的に調整することで効率の良い通信を実現することを考える。選択確率の調整方法として、アトラクタ選択モデルの状態変数 (m_i) の割合に応じて各次ホップの選択確率 (p_i) を決めることが考えられる ($p_i = \frac{m_i}{\sum_{k=1}^M m_k}$)。しかし、アトラクタ選択モデルはアトラクタの位置が固定されているために状態変数の取り方も限定され、片道遅延対して柔軟に状態変数が決定できない。よって、アトラクタ選択モデルを確率的経路制御に応用する場合は状態変数が遅延時間に

対してより柔軟に決定できるようにモデルを拡張する必要がある。

3.1 アトラクタ更新モデル

計測した片道遅延に対してより柔軟に選択確率を調整するため、アトラクタ選択モデルでは固定されていたアトラクタの位置を、計測した片道遅延に応じて更新するようにモデルの拡張を行う。アトラクタの位置を更新するということは、安定状態時の状態変数にとる値を変更するということである。このアトラクタの位置を、隣接ノード i を選択した場合の片道遅延 d_i に応じて調整するため、以下のような関数 $f(d)$ を設定する。宛先ノードが隣接ノードに含まれている場合は、通信遅延によらず、必ずその宛先ノードである隣接ノードを選択する。

$$f(d) = \max[e^{-(\frac{d}{D})^2}, C] \quad (6)$$

関数 $f(d)$ は、遅延 d に対する減少関数で、遅延が大きくなる程小さな値を、遅延が小さくなる程大きな値をとる。よって、各状態変数 m_i を関数の出力値 $f(d_i)$ に追従するように設定することで、片道遅延に応じた適応的なアトラクタ更新ができるようになる。 D は許容遅延時間を表すパラメータであり、この閾値を境に $f(d)$ の値は急激に減少する。 C は $f(d)$ の下限を設定するパラメータであり、 $f(d_i)$ の値が極小になることで隣接ノード i を選択する確率が著しく小さくなることを防いでいる。関数の出力値 $f(d_i)$ をそのまま m_i に設定すると、フローの急激な変化が起こり経路が混雑することが考えられ、それが原因で効率的な制御ができなくなる可能性がある。よって、時定数 τ で m_i が $f(d_i)$ へ到達する速度を調整する必要がある。従って、アトラクタ更新モデルでの状態変数の計算式は (7) のようになる。

$$\frac{dm_{d,i}}{dt} = -\frac{1}{\tau}(m_{d,i} - f(d_i)) \quad (7)$$

図 2 は、状態変数が二つの場合のアトラクタ更新モデルの動作の概念図である。アトラクタ選択モデルでは、アクティビティの値によってポテンシャルの深さが変わり、ゆらぎによるランダムウォークでアトラクタ間を遷移していたが、アトラクタ更新モデルではアトラクタ自体が移動するので、ポテンシャルの深さが変わることは無い。アトラクタ選択モデルでは、アトラクタの位置が固定されていたため、どちらか一方の状態変数が大きくなるアトラクタしか存在せず、そのアトラクタ以外で安定できなかったが、アトラクタ

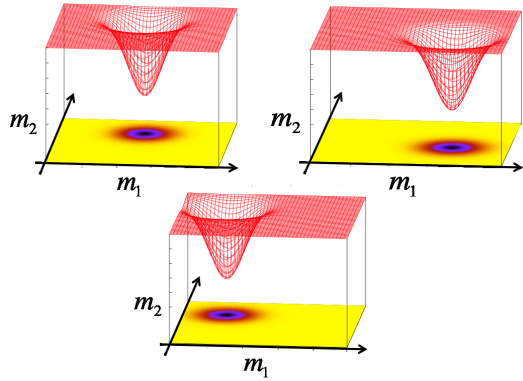


図 2 アトラクタ更新モデルの概念図: アトラクタの位置更新

更新モデルでは、図 2 の下の図のように、アトラクタ選択モデルには存在しないアトラクタをとることも可能であり、状態変数によりより柔軟な次ホップ選択確率 p_i の調整が可能となっている。

3.2 アトラクタ更新モデルでの経路制御

アトラクタ更新モデルで使用する片道遅延は、制御周期 T 内で送ったパケットの片道遅延の平均 $\bar{d}_i$ を用いる。 $f(d_i)$ の計算および状態変数 m_i の更新は制御周期毎に行う。制御周期内にパケットを一回以上送信したにも関わらず、片道遅延が得られない場合は、片道遅延が無限にかかったと捉え、 $f(d_i) = C$ と設定する。各隣接ノードを次ホップとして選択する確率 p_i は、 $p_i = \frac{m_i}{\sum_{k=1}^M m_k}$ と設定する。

4. 1 ノードの場合の挙動

この章では、自分以外のトラヒックを考慮に入れない環境で、アトラクタ選択モデルを用いた経路制御、アトラクタ選択モデルによる確率的経路制御 (確率的アトラクタ選択モデル)、アトラクタ更新モデルによる確率的経路制御の三手法で、使用経路以外の経路改善が起こった場合の挙動を調査する。

4.1 シミュレーション設定

シミュレーション環境として、送信ノード一つとその隣接ノード 3 つを用意する (図 3)。シミュレーション時刻の単位として step を設定し、1 step 毎に各経路制御手法で隣接ノードを一つ選択し、遅延を取得する。片道通信遅延は、各時刻毎に各隣接ノード選んだ場合のサンプルを用意する。サンプルは、隣接ノード 1 は全ての時刻に置いて平均 4 分散 0.5 の正規分布から用意、隣接ノード 2 は全ての時刻に置いて

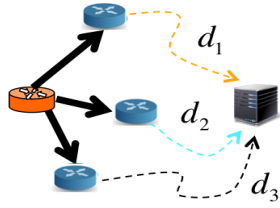


図 3 1 ノードのシミュレーション環境

て平均 7, 分散 0.5 の正規分布から用意し, 隣接ノード 3 は, 7500 step までは平均 10, 分散 0.5, 7500 step 以降は平均 0.5, 分散 0.5 の正規分布から用意する. よって, 図 4 のような遅延のサンプルが生成される. 各経路制御の経路情報は, 制御周期毎に行うもの

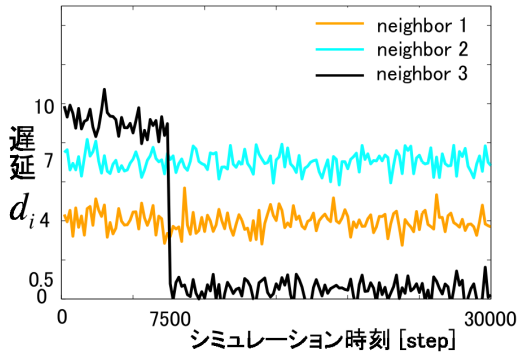


図 4 シミュレーションで与えるサンプル例

とする. このシミュレーションで利用するパラメータの各種設定は表 1 の通りである. シミュレーションは 100 回試行し, 遅延サンプルは 1 回毎に生成し直す. この設定で, 各経路制御手法での通信遅延の変化を調査する.

シミュレーション時間	30000 [step]
制御周期	200 [step]
β	10
γ	3
アトラクタ選択モデルのノイズ係数	$(1.8 - \alpha)^3$
τ	0.15
C	0.0003
D	3.0
dt	0.05

表 1 シミュレーション設定

4.2 シミュレーション結果

上記のシミュレーション設定でシミュレーションを行った場合のシミュレーション結果を図 5 に示す.

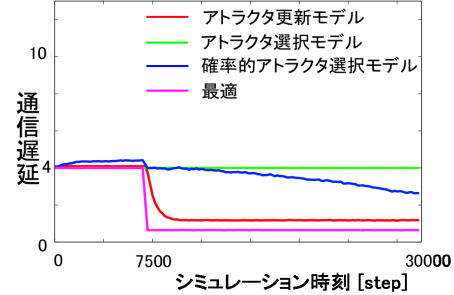


図 5 1 ノードの場合の挙動

図 5 を見ると, アトラクタ選択モデルを用いた場合, 最短の遅延を示す隣接ノードが変わっても, 同じ遅延をとり続けていることが分かる. これは, シミュレーション開始時点で選択していた隣接ノードの遅延時間の悪化が起らないため, アクティビティの値が減少しないことに起因する.

確率的アトラクタ選択モデルを用いた場合, 通信遅延が時刻が進む毎に短くなっているが, 最適な隣接ノードを選択した場合と比べて遅延が大きくなっていることが分かる. これは, アトラクタ選択モデルではアトラクタ間の遷移がノイズによるランダムウォークによって行われるため, 経路の変更に時間がかかることに加え, アトラクタの位置が固定のため遅延に対して柔軟な確率の分配ができないことに起因する.

アトラクタ更新モデルを用いた場合, サンプルとして与えている遅延の変動に対応し, 最適な隣接ノードを選択した場合の通信遅延に近い性能を示していることが分かる. これは, アトラクタ更新モデルが, 各隣接ノードから取得した遅延情報に応じて適応的に確率の調整を行ったことに起因する. しかし, 最適な遅延には達しない. これは, 平均遅延が 4 である隣接ノード 1 をある一定の割合で選択するという並列利用を行った結果である.

5. ネットワークでの性能評価

5.1 シミュレーション環境

本稿で用いるシミュレーションプログラムは C++ で作成した. ネットワークトポロジーは, Waxman model [8] に基づいて生成した図 6 のトポロジを使用

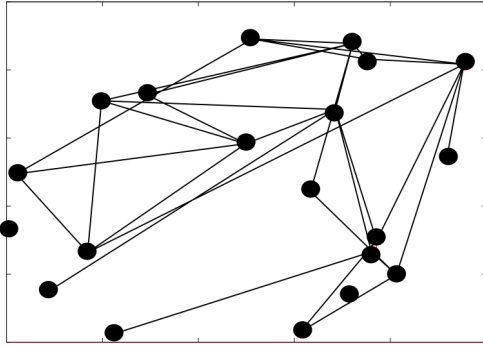


図 6 シミュレーションで利用したネットワークトポロジ

する。

なお、エンド間の通信は到達可能なノード間のみで行い、到達可能な宛先ノード全てに対し、ある周期でパケットを生成するものとする。エンド間の通信にかかる片道遅延は、リンクの伝搬遅延とキューイング遅延のみを考慮し、アプリケーション遅延は考えないものとする。各経路制御アルゴリズムで使用する片道遅延は、どちらも制御周期内のデータパケット通信にかかった片道遅延の平均とする。片道通信遅延は、送信したパケットが宛先ノードに到達した場合、タイムラグなしで取得する。本稿でいうリンクは双方向のリンクを指し、双方向からの同時送信によるデータの衝突は考えない。シミュレーションで利用したネットワーク、パケット及びアトラクタ選択モデル、アトラクタ更新モデルの各種設定は表 2 の通りである。なお、文献[6]では、ノイズ項 η_i に係数を設定していないが、本シミュレーションでは、アクティビティの値が低いときにアトラクタ間の遷移が起りやすいように、係数を設定している。また、シミュレーション開始時点で、ネットワーク中の全ノードは経路情報を保持しておらず、経路の探索からシミュレーションが始まる。

5.2 シミュレーションシナリオ

本シミュレーションでは、アトラクタ選択モデルを用いた経路制御では対応できなかった他経路の遅延改善が起こった時、アトラクタ選択モデル及びアトラクタ更新モデルがどのように対応するのかを調査する。よって、以下のようなシナリオ下でシミュレーションを行う。

(1) シミュレーション時刻が 75 s になるまでは、図 7 に示す赤いリンクのノード間の通信のパケット生成レートを 0.1 ms (リンクがパケット一つをリンクに

シミュレーション時間	300 s
制御周期	1 s
ノード数	20
リンク数	30
リンク容量	100 Mbps
伝搬遅延	3 ms
パケットサイズ	1250 bytes
β	10
γ	3
アトラクタ選択モデルのノイズ係数	$(1.8 - \alpha)^3$
τ	1
C	0.001
D	5.0
dt	0.05

表 2 シミュレーション設定

のせるのにかかる時間) に設定し、このノード間のトラヒックを混雑させる。他のエンド間の通信のパケット生成レートは 30 ms に設定する。

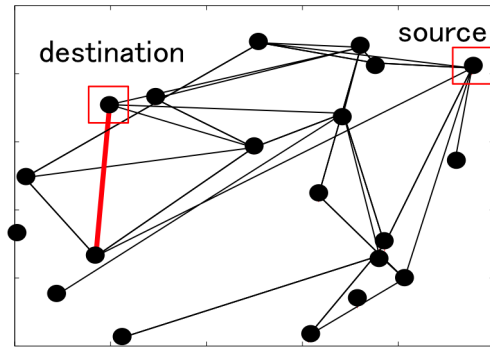


図 7 シナリオで混雑するリンク (赤いリンク)

(2) シミュレーション時刻 75 s 以降は、全てのエンド間のパケット生成レートを 30 ms に設定する。

(3) アトラクタ選択モデルおよびアトラクタ更新モデルを用いた経路制御で、図 7 で示した source, destination のノード間の片道通信遅延が、時刻変化に応じてどのように変化するかを示し、環境変動に対応できているかを調査する。

5.3 シミュレーション結果

上記のシミュレーション条件、シミュレーションシナリオでアトラクタ選択モデル及びアトラクタ更新

モデルを動作させた場合の、アトラクタ選択モデル及びアトラクタ更新モデルを用いた経路制御をした際の、指定ノード間の片道遅延時間の時間遷移を図8に示す。

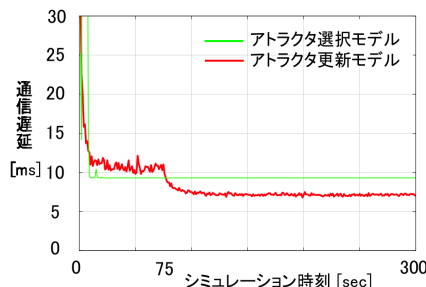


図8 シミュレーション結果

図8を見ると、フローの混雑が解消する75sを境にアトラクタ更新モデルを用いた場合の通信遅延が低下し、7ms近傍の値を示しているのに対し、アトラクタ選択モデルを用いた場合の通信遅延は、75s以降も、75s以前と変わらない通信遅延10msを示していることが分かる。これは、アトラクタ選択モデルがシミュレーション開始時点で指定ノード間の混雑を感知して迂回経路を選択し、混雑が解消した後も迂回経路の遅延が悪化しないために迂回経路を使用し続けている一方で、アトラクタ更新モデルは確率的な経路選択によって混雑経路の探索を行い、75s以降の遅延改善を感知し、選択確率の調整を行っているため(図9参照)である。

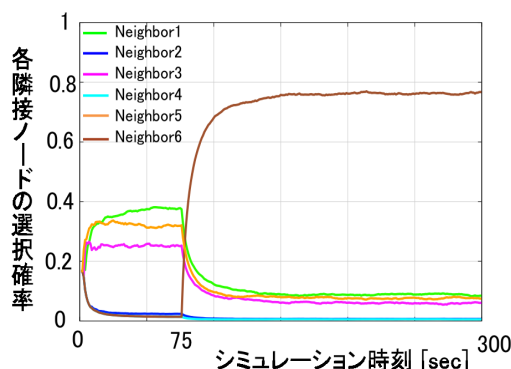


図9 隣接ノード選択確率の時間遷移

6. まとめ

本稿では、従来のアトラクタ選択モデルでは対応

できなかった使用経路以外の遅延改善に対して、複数経路を確率的に並列利用することで遅延除法を取得し、取得した遅延情報に応じて経路選択の確率を適応的に調整することで対応しようとした。確率の調整にあたって、アトラクタ選択モデルではアトラクタの位置が固定されているために柔軟な確率調整が行えないことを指摘し、その問題点を克服するため、アトラクタの位置を更新する新規なアトラクタ更新モデルを考案し、ネットワークを模したシミュレーションで使用経路以外の遅延改善に対応可能であることを示した。

今後の課題として、パケットのループが原因のパケットロスの削減と、アトラクタ更新モデルのパラメータ設定による性能評価を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、平成27年度総務省委託研究「変動する通信状況に適應する省エネなネットワーク制御基板技術の研究開発」による。

文 献

- [1] S. Paul, J. Pan, and R. Jain. Architectures for the Future Networks and the Next Generation Internet: A Survey. Computer Communications, pp. 2 42, January 2011.
- [2] 若宮直紀, 村田正幸. 生物に着想を得た情報ネットワーク制御. 電子情報通信学会, pp. 316 323, March 2006.
- [3] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo. Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection. PLoS ONE, p. p. e49, December 2006.
- [4] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata. Biologically inspired adaptive multi- path routing in overlay networks. IFIP/IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SELF-MANAGED SYSTEMS & SERVICES (SELFMAN 2005), May 2005.
- [5] N. Asvarujanon, K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata. Robust and Adaptive Mobile Ad Hoc Routing with Attractor Selection. ADAMUS2010 Workshop in conjunction with ICP2010, pp. 13 15, July 2010.
- [6] N. Onzuka, N. Wakamiya, and M. Murata. Robust and lightweight routing with attractor selection. In AWERProcedia Information Technology & Computer Science, December 2013.
- [7] T. Nakao, J. Teramae, and N. Wakamiya. Distributed routing protocol based on biologically-inspired attractor selection with active stochastic exploration and a short term memory. Autonomic and Trusted Computing(ATC-2014), pp. 473 478, December 2014.
- [8] B. M. Waxman, "Routing of multipoint connections," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 6, pp. 1617-1622, Dec. 1988.