

# オーバーレイネットワークにおけるアトラクタ選択モデルを用いた マルチパス経路制御手法の提案と評価

井上 貴博<sup>†</sup> 若宮 直紀<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{t-inoue,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし オーバレイネットワークは、リンク、ルータなどの物理網資源を共有、競争するため、あるオーバーレイネットワークからみた通信品質は他のオーバーレイネットワークの影響を受け、大きく変動する。我々の研究グループでは、ネットワークの環境変動のもとで、適応的かつ安定して高品質なオーバーレイ通信を行うための、オーバーレイマルチパス経路制御手法を提案している。本稿では、生物システムにおける柔軟な環境適応の非線形数理モデルであるアトラクタ選択モデルを拡張し、経路の負荷に応じて複数の経路にトラヒックを配分する手法を提案する。シミュレーション評価により、バックグラウンドトラヒックの影響による経路の負荷状態の変動に応じて、オーバーレイネットワークが適応的にトラヒックを経路間で割り振るとともに、トラヒック量を調整するマルチパス経路制御が達成できることを示す。キーワード オーバレイネットワーク、アトラクタ選択モデル、マルチパス経路制御

## Attractor selection-based multipath routing in overlay networks

Takahiro INOUE<sup>†</sup>, Naoki WAKAMIYA<sup>†</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{t-inoue,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Since a variety of overlay networks shares and competes for shared physical resources such as routers and links, the quality of communication provided to an overlay network dynamically changes and such changes cannot be predicted. In this paper, by adopting a nonlinear mathematical model called an attractor selection model for flexible and adaptive behavior of biological systems to dynamically changing environment, we propose an adaptive multipath routing mechanism for overlay networks. Our proposed mechanism distributes traffic among multiple available paths taking into account their loads. In addition, the amount of traffic injected into a network is also dynamically adapted by being based on the attractor selection model. Simulation results indicate that our proposal successfully controls traffic in an adaptive manner under the condition where loads on paths dynamically change being affected by background traffic.

**Key words** Overlay Network, Attractor Selection Model, Multipath Routing

### 1. はじめに

多様なアプリケーションやネットワークサービスの通信品質要求を満足するため、インターネット上には様々なオーバーレイネットワークが構築されており、それぞれがスループットや遅延などを向上させるように独立に経路制御、トラヒック制御、トポロジ制御などを行っている。

オーバーレイネットワークは互いにリンクやルータなどの物理網資源を共有するため、あるオーバーレイネットワークの利己的

な制御は他のオーバーレイネットワークの性能低下や新たな利己的制御を引き起こす。例えば、ある物理リンクが輻輳すると、その物理リンクを使用しているオーバーレイネットワークは、通信品質の改善のため、他の空いている物理リンクを利用するようにトポロジや経路を変更する。その結果、空いていた物理リンクを使用していたオーバーレイネットワークの通信品質が低下し、性能向上のための適応的、利己的な制御を実施するようになる。また、元々輻輳していたリンクの負荷状態が軽減されるため、他のオーバーレイネットワークがそのリンクを使用するよ

うにトポロジを変更することも考えられる．このように，オーバーレイネットワークが物理網資源を共有する環境では，オーバーレイネットワークの利己的な制御が連鎖的に引き起こされ，システムが不安定になり，結果として，ネットワークシステム全体の性能が劣化することが指摘されている [1] [2] ．

このような資源共有環境におけるオーバーレイネットワークの性能劣化の解消，システム安定性の向上を図る提案がいくつかなされている．例えば，文献 [1] では，オーバーレイネットワークが greedy に通信品質が最大の経路を選択することがシステムの不安定性を引き起こすことを明らかにし，利用可能帯域に比例した確率で経路を選択する，あるいはランダムに選択した経路候補のうち品質が最も高い経路を選択するなどの手法を用いることにより，利己的制御の連鎖を抑え，オーバーレイネットワークの経路変更回数を減らせることを示している．

我々の研究グループでは，物理網資源を共有する他のオーバーレイネットワークの振る舞いなどによってネットワークの負荷状態が変動する環境において，高品質で安定した通信を行うためのオーバーレイマルチパス経路制御手法を提案している [3] ．提案手法では，環境変化に対する適応性と制御の安定性を獲得するため，生物システムにおける環境適応メカニズムの非線形数理モデルであるアトラクタ選択モデルを応用している．バクテリアは内部に明示的な適応ルールを持たないにもかかわらず，環境の栄養状態に応じて，適応的に不足している栄養素を生成し，自身の活性度や成長率が向上するように振る舞う [4] ．提案手法では，生物システムにおける環境の栄養状態をオーバーレイネットワークにおける経路の通信品質，栄養の生成を経路選択，および活性度を通信性能にそれぞれ対応づけることにより，適応的で安定な経路制御を実現している．

本稿では，通信環境変動に応じて負荷分散を考慮しながら適応的に安定した通信を実現するオーバーレイマルチパス経路制御手法を提案し，その有効性をシミュレーションによって評価する．提案手法では，拡張したアトラクタ選択モデルにもとづいてそれぞれの経路へのトラフィック配分を決定するとともに，ネットワークへ送出するトラフィック量を制御する．

以下，2. では，拡張したアトラクタ選択モデルの概要について述べ，3. で，拡張したアトラクタ選択モデルにもとづくオーバーレイマルチパス経路制御手法を提案する．4. で，提案する手法の有効性をシミュレーション評価によって示し，最後に 5. で，本稿のまとめと今後の課題について述べる．

## 2. 拡張アトラクタ選択モデル

アトラクタとは，非線形ダイナミクスにおいて，初期状態から過渡状態を経てシステムが安定的に収束する状態を指す．アトラクタ選択モデルは，バクテリアが培地内の栄養状態に応じた適切な栄養生成，すなわちアトラクタを適応的に選択する振る舞いをモデル化した非線形数理モデルである．

培地内にはバクテリアの成長にとって必須な栄養 a, b があり，これらの栄養はバクテリア体内でも生成される．また，バクテリア内外の栄養の濃度差により，細胞膜の浸透によって，バクテリアと培地間で栄養がやりとりされる．拡張したアトラ

クタ選択モデルでは，バクテリア  $i$  ( $1 \leq i \leq H$ ) の体内における栄養 a, b それぞれの生成量  $xs1_i, xs2_i$  の変化は時間発展方程式 (1) および式 (2) によって計算される．なお， $H$  は培地内のバクテリア数である．

$$\frac{d}{dt} xs1_i = \mu_i \left( \frac{1}{1 + (xs2_i \times 10)^2} - xs1_i \right) + \eta(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} xs2_i = \mu_i \left( \frac{1}{1 + (xs1_i \times 10)^2} - xs2_i \right) + \eta(t) \quad (2)$$

ここで， $\mu_i$  ( $0 \leq \mu_i \leq 1$ ) はバクテリア  $i$  の成長率を表すアクティビティと呼ばれる値であり，式 (3) で与えられる． $\eta(t)$  は白色ガウス雑音であり，バクテリア内外のノイズやゆらぎに起因する生成量の変化に相当する．式 (1) および式 (2) の右辺第 1 項の括弧内は，アトラクタのポテンシャルを与える式である．バクテリア内の栄養生成は相互抑制関係にあり，本式では，栄養の生成量は  $xs1_i \rightarrow 1, xs2_i \rightarrow 0$ ，または  $xs1_i \rightarrow 0, xs2_i \rightarrow 1$  のいずれかのアトラクタに収束する．右辺第 1 項には成長率  $\mu_i$  が乗算されているため，成長率  $\mu_i$  が高いときにはアトラクタのポテンシャルが深くなり，アトラクタへ引き込まれ，状態が安定する．一方，成長率  $\mu_i$  が小さいときには，右辺第 1 項に対してノイズ項の影響が大きくなり，バクテリア内の栄養生成量の変化量はノイズによってランダムに決定される．

バクテリア  $i$  の成長率  $\mu_i$  は次式により与えられる．

$$\mu_i = \frac{1}{\left(1 + \frac{0.5}{x_{ao} + xs1_i - CON\_A \mu_i}\right)^2} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{0.5}{x_{bo} + xs2_i - CON\_B \mu_i}\right)^2} \quad (3)$$

$x_{ao}, x_{bo}$  はそれぞれ培地内の栄養 a, 栄養 b の濃度である．また， $CON\_A, CON\_B$  は，それぞれバクテリアが成長に消費する栄養 a, 栄養 b の量を表す定数である．式 (3) により，成長のための栄養消費  $CON\_A, CON\_B$  に対して体内で生成される栄養量  $xs1_i, xs2_i$  と培地の栄養量  $x_{ao}, x_{bo}$  が十分であればバクテリア  $i$  の成長率  $\mu_i$  は 1 に近くなり，いずれかの栄養が不十分であれば，バクテリアは成長できず，成長率  $\mu_i$  が 0 に近くなる．

培地内の栄養 a, および栄養 b の濃度  $x_{ao}, x_{bo}$  の変化はそれぞれ，式 (4)，式 (5) で与えられる．

$$\frac{d}{dt} x_{ao} = 0.3(F_a - x_{ao}) + \sum_j x_{vj} \times (xs1_j - CON\_A \mu_j) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} x_{bo} = 0.3(F_b - x_{bo}) + \sum_j x_{vj} \times (xs2_j - CON\_B \mu_j) \quad (5)$$

バクテリアの培養では外部から反応器へ新しい培地を導入すると同時に同量の培地を反応器から排出しており，右辺第 1 項は，この操作による培地内の栄養の濃度変化を表す． $F_a, F_b$  は，それぞれ外部から導入する培地内の栄養 a, 栄養 b の濃度である．右辺第 2 項は，バクテリアと培地間の細胞膜を介した栄養のやりとりを表す．

バクテリア  $i$  の体積  $xv_i$  は次式により変化する．

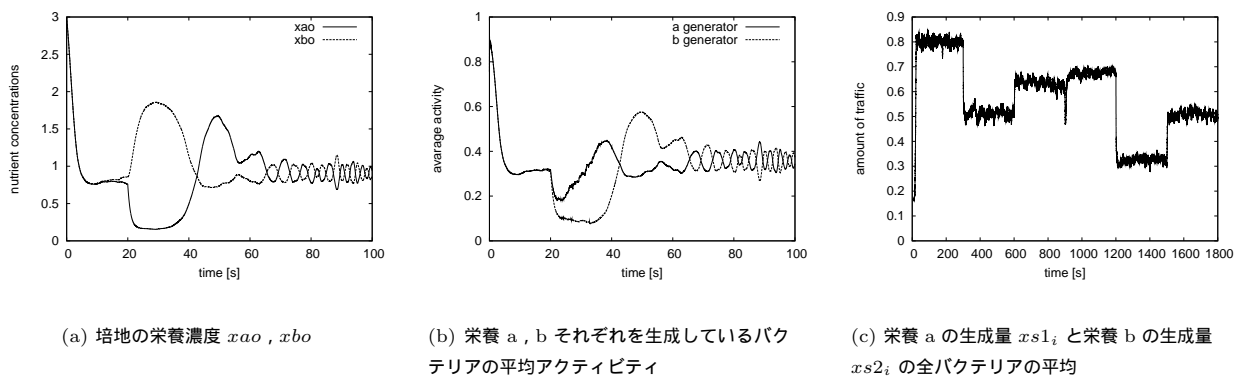


図 1 拡張アトラクタ選択モデルのシミュレーション結果

$$\frac{d}{dt}xv_i = \mu_i \times xv_i \quad (6)$$

式 (6) に表されるとおり、バクテリア  $i$  の体積  $xv_i$  は成長率  $\mu_i$  が大きいほど早く増加する。バクテリア  $i$  は、体積  $xv_i$  が初期体積  $xv_{init}$  の 2 倍になると、細胞分裂し、バクテリア  $i$  の体積  $xv_i$  は  $xv_{init}$  になり、同じ体積  $xv_{init}$  の新たなバクテリア  $H+1$  が生まれる。バクテリア  $H+1$  の栄養生成量  $xs1_{H+1}$ ,  $xs2_{H+1}$ , および成長率  $\mu_{H+1}$  はもとのバクテリア  $i$  の栄養生成量  $xs1_i$ ,  $xs2_i$ , および成長率  $\mu_i$  とそれぞれ等しい。また、成長率や栄養状態によらず、単位時間ごとに確率  $p$  でバクテリア  $i$  は死に、または反応器から排出され、バクテリア数が減る。

拡張したアトラクタ選択モデルのもとでは、バクテリアは次のように適応的な栄養生成を行う。培地内に栄養 a, b の両方が十分にある場合には、バクテリアがいずれの栄養を生成しているかによらず成長率は高く、培地内のバクテリア数が増える。このとき、培地内には栄養 a をより多く生成するバクテリアと栄養 b をより多く生成するバクテリアが同数存在する。ここで、培地の栄養状態が変化し、栄養 a の量が不十分な環境を考える。栄養 a をより多く生成しているバクテリアは、培地内の栄養 a の不足を体内の栄養 a で補うことにより成長し、個体数を増やし続けることができる (式 (3))。一方、栄養 b をより多く生成しているバクテリアは、栄養 a が不足するため、成長率が低下する。その結果、式 (1)、式 (2) においてノイズ項の影響が大きくなり、栄養 b をより多く生成していたバクテリアの中に、栄養 a をより多く作るバクテリアが現れる。このバクテリアの成長率は栄養 a を生成することによって増加するため、栄養 a をより多く作るアトラクタへの引き込みが生じ、安定的に栄養 a を生成し続けるようになる。一方、栄養 b を生成し続けているバクテリアは成長率が低下し続けるため、バクテリア数が減少する。したがって、時間の経過とともに、培地内には不足している栄養 a をより多く生成するバクテリアが多く存在するようになり、貧栄養状態でもバクテリアが生存できる。

拡張したアトラクタ選択モデルのシミュレーション結果を示す。初期バクテリア数を 30、栄養生成量  $xs1_i$ ,  $xs2_i$  の初期値をいずれも 0.5、初期体積  $xv_{init}$  を 0.01、栄養の消費率  $CON\_A$  と  $CON\_B$  をいずれも 1.4 とした。また、ノイズ項は平均 0、

分散 0.01 の白色ガウス雑音とした。培地の栄養濃度  $x_{ao}$ ,  $x_{bo}$  の初期値をいずれも 3.0 とした。反応器へ導入する培地の栄養濃度  $F_a$ ,  $F_b$  の初期値をいずれも 2 とし、時刻 20 で  $F_a$  を 0 に変化させた。

100 秒間のシミュレーションにおける、培地の栄養濃度  $x_{ao}$ ,  $x_{bo}$ , 栄養 a, b のそれぞれを生成しているバクテリアの平均成長率、栄養 a の生成量  $xs1_i$  と栄養 b の生成量  $xs2_i$  の全バクテリアの平均のそれぞれの変化の様子を図 1(a), 図 1(b), 図 1(c) に示す。初期状態から収束した後、時刻 20 秒で栄養 a の供給が停止され、培地内の栄養 a の濃度が減少している。このため、図 2 に示されるように、栄養 b を生成しているバクテリアのアクティビティが低下する。これらのバクテリアは式 (1)、式 (2) のノイズ項の影響により栄養 a を生成するようになり、図 1(c) に示されるように、栄養 a の生成量が増加する。その結果、培地内の栄養 a の濃度  $x_{ao}$  が増加し、栄養 b を生成しているバクテリアのアクティビティも向上する。なお、図 1(b) において時刻 20 秒以降に栄養 a を生成しているバクテリアの平均アクティビティが低下しているのは、それまで栄養 b を生成していたアクティビティが低いバクテリアが栄養 a を生成するようになったことによる。本シミュレーションでは、多くのバクテリアが不足している栄養 a を生成するようになったため、およそ時刻 43 秒以降で培地内に栄養 a が過剰に存在するようになっているが、アクティビティは低下しておらず、バクテリアは十分に成長を続けることができている。また、時間の経過とともに、培地内に栄養 a, b が同量程度存在するような栄養の生成が安定して実現されていることがわかる。

### 3. アトラクタ選択モデルを用いたオーバーレイマルチパス経路制御手法の提案

本章では、拡張したアトラクタ選択モデルを用いて適応的で安定したオーバーレイマルチパス経路制御を行う手法を提案する。

#### 3.1 対象システム

オーバーレイネットワークでは、オーバーレイネットワークを構成するノード間の接続を仮想的、または論理的なリンクと見なした、論理的なトポロジを構成し、経路制御を行う。オーバーレイネットワークのノード間の論理的な経路は、連続した論理リ

ンクによって構成される．また，それぞれの論理リンクは，物理網の経路制御によって論理リンクの両端のノード間に設定された物理的な経路，すなわち連続した物理リンクによって実現される．提案するオーバレイマルチパス経路制御手法では，オーバレイネットワークのあるノード対の間に複数の論理経路が利用可能であることを前提とするが，必ずしも論理経路が物理的に独立している必要はない．なお，本稿では複数経路の構築管理手法は特に定めない．

送信側のノードは，利用可能な複数の論理経路にトラフィックを振り分けて送信する．論理経路を構成する中継ノードが論理経路に関する情報を保持している場合には，送出するメッセージのヘッダに経路の識別子を付加し，送信側ノードのみが経路情報を持つ場合には，中継するノードのリストをヘッダ情報として付加する．中継ノードは，メッセージを受信すると，ヘッダ情報に従って適切なノードにメッセージを転送する．

### 3.2 アトラクタ選択モデルにもとづくマルチパス経路制御手法

本稿では，アトラクタ選択モデルにおけるバクテリアの集合をセッション，培地内の栄養の濃度を経路の負荷，バクテリア内の栄養の生成量を経路へのトラフィック配分と見なすことで，複数経路を負荷に応じて適応的に利用する経路制御手法を提案する．また，バクテリアの体積をトラフィック量とすることで，ネットワークに送出するトラフィック量も負荷に応じて制御することができる．

送受信ノード間には  $N$  セッションが存在し，セッション間では同じ  $M$  本の論理経路を共有しているものとする．セッション  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) がネットワークに送出するトラフィック量  $T_i$  は次式で与えられる．

$$T_i = \sum_{j=1}^{L_i} v_{i,j} \quad (7)$$

ここで， $v_{i,j}$  はトラフィック  $i$  に属する仮想的な小トラフィック（マイクロトラフィックと呼ぶ）の量であり，前章のアトラクタ選択モデルにおけるバクテリアの体積に相当する．なお， $L_i$  はマイクロトラフィックの数である．セッション  $i$  が経路  $k$  ( $1 \leq k \leq M$ ) に送出するトラフィック量  $T_i(k)$  は次式で定められる．

$$T_i(k) = \sum_{j=1}^{L_i} v_{i,j} \frac{x_{i,j}(k)}{\sum_{l=1}^M x_{i,j}(l)} \quad (8)$$

なお， $T_i = \sum_{k=1}^M T_i(k)$  である．

セッション  $i$  のマイクロトラフィック  $j$  のトラフィック量  $v_{i,j}$  の経路  $k$  への配分率を定める  $x_{i,j}(k)$  の変化は，式 (2) を  $M$  次元拡張した次式によって与えられる．

$$\frac{d}{dt} x_{i,j}(k) = \mu_{i,j} \left( \frac{1}{1 + \left( \sum_{l=1, l \neq k}^M x_{i,j}(l) \times 10 \right)^2} - x_{i,j}(k) \right) + \eta(t) \quad (9)$$

アクティビティ  $\mu_{i,j}$  はセッション  $i$  のマイクロトラフィック  $j$  にとっての通信効率を表す指標であり，経路の利用状態にもと

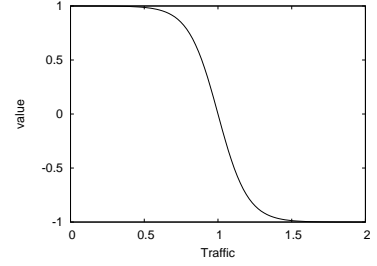


図 2  $x_{lim}(k) = 1$  におけるトラフィック量とシグモイド関数の対応

づき次式によって与えられる．

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{\prod_{k=1}^M \left\{ 1 + \left( \frac{0.5}{\rho(k) + x_{i,j}(k) - C(k)} \right)^2 \right\}} \quad (10)$$

ここで， $C(k)$  は経路  $k$  の通信容量に比例する定数， $\rho(k)$  は経路  $k$  への負荷を表す．したがって，経路の通信容量に対して負荷とトラフィック配分が十分であればアクティビティが向上することとなり，これによって通信容量に応じた複数経路への負荷分散を実現することができる．

また，経路  $k$  の負荷  $\rho(k)$  の変化は次式で与えられる．

$$\frac{d}{dt} \rho(k) = \sum_{i,j} v_{i,j} \times (x_{i,j}(k) - C(k) \mu_{i,j}) \quad (11)$$

実際の動作環境において，オーバレイネットワークが経路負荷を計算するためには，同じ物理網資源を共有している他のオーバレイネットワークの  $v_{i,j}$ ， $x_{i,j}(k)$ ， $\mu_{i,j}$  を知らなければならない．しかしながら，アプリケーションやユーザごとに設定，構築されるオーバレイネットワークの情報を集中管理する機構は現在存在しない．そのため，文献 [1] と同様に計測によって経路の負荷状態を知る，あるいは P4P [5] によって物理網に関する情報を得る，または i3 [6] のような機構によってオーバレイネットワーク間で情報交換を行うといった方法を用いて経路負荷  $\rho(k)$  を算出する．

セッション  $i$  のマイクロトラフィック  $j$  のトラフィック量  $v_{i,j}$  の変化は次式で与えられる．

$$\frac{d}{dt} v_{i,j} = \mu_{i,j} \times v_{i,j} \times \left( \frac{2}{1 + \sum_{k=1}^M \frac{x_{i,j}(k)}{\sum_{l=1}^M x_{i,j}(l)} e^{-g(x_{lim}(k) - T(k))}} - 1 \right) \quad (12)$$

右辺第 3 項は，経路  $k$  ごとの総トラフィック量を制限するための項である．アトラクタ選択モデルでは，培地の導入・排出と，バクテリアの細胞分裂・死によって反応器内のバクテリア数が制御されているが，提案手法ではシグモイド関数によってトラフィック量を制御する． $x_{lim}(k)$  は経路  $k$  を流れるトラフィック量の上限值であり，アプリケーションまたは経路  $k$  の通信容量によって定められる．経路  $k$  の総トラフィック量  $T(k)$  は次式で与えられる．

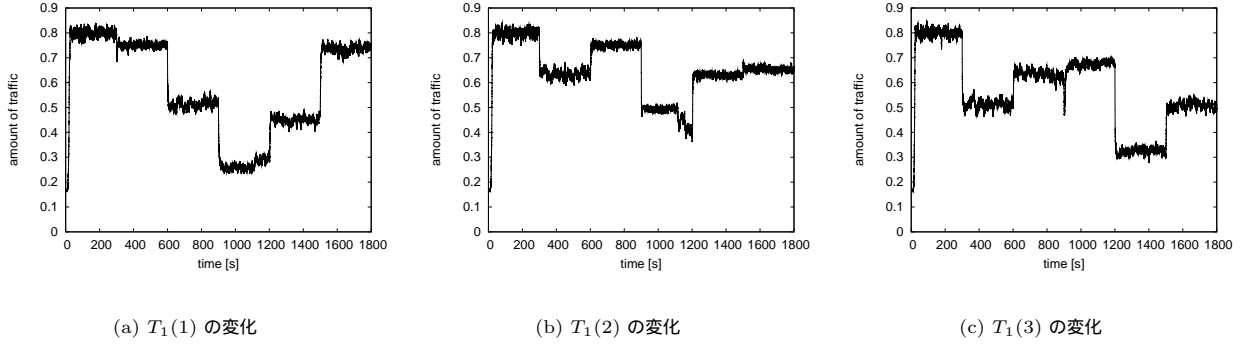


図 4 それぞれの経路のトラフィック量  $T_1(k)$  の時間変化

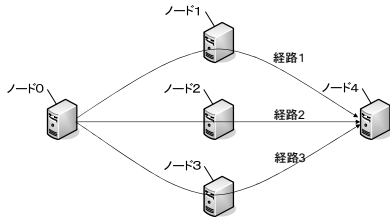


図 3 シミュレーションに利用する物理トポロジ

$$T(k) = \sum_{i=1}^N T_i(k) \quad (13)$$

経路  $k$  の総トラフィック量  $T(k)$  が 0 に近いときシグモイド関数により右辺第 3 項は 1 に近くなり、上限値  $x_{lim}(k)$  に近づくと 0 に、さらに上限値を超えると  $-1$  に近くなる (図 2)。これにより、経路の総トラフィック量が上限値に満たない場合には右辺第 1 項と第 2 項によりアクティビティに応じてトラフィック量が増加し、総トラフィック量が上限値に近づくとトラフィック量の増加が抑えられ、上限値を超えた場合にはトラフィック量が減少するようになる。

#### 4. シミュレーション評価

本章では、アトラクタ選択モデルを用いたオーバレイマルチパス経路制御手法の有効性を、シミュレーションにより評価する。

##### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーションには ns-2 を使い、図 3 に示す物理トポロジ上に、ノード 0 を送信元、ノード 4 を送信先として 3 本の論理経路 ( $M = 3$ ) を構築した。経路によらず、 $C(k)$  を 0.5、 $x_{lim,1}(k)$  を 0.8 とし、初期負荷  $\rho(k)$  を 0 とした。また、セッションは 1 つとし、初期マイクロトラフィック数  $L_1 = 50$ 、トラフィック配分の初期値を  $x_{1,j}(k) = 0.2$ 、 $x_{lim,i}(k) = 0.8$  とした。また、アクティビティ  $\mu_i$  の初期値を 0、 $v_{init} = 0.01$  とした。

アトラクタ選択モデルを用いたマルチパス経路制御手法の有効性を示すため、バックグラウンドトラフィックを加え、セッション 1 がバックグラウンドトラフィックの変化に応じて、適応的に経路ごとのトラフィック量を変更する事を示す。バックグラウンドトラフィックとして、一定のマイクロトラフィックを発生さ

表 1 バックグラウンドトラフィックの時間変動

time (s)	$L_2$	$v_{2,j}$	$x_{2,j}(1)$	$x_{2,j}(2)$	$x_{2,j}(3)$	$\mu_{2,j}$
0	0	0	0.01	0	0	0.5
300	50	0.01	0.1	0.3	0.6	0.5
600	50	0.01	0.6	0.1	0.3	0.5
900	100	0.01	0.6	0.3	0.1	0.5
1200	100	0.01	0.4	0.2	0.6	0.5
1500	50	0.01	0.1	0.3	0.6	0.5

せるセッション 2 を設定し、 $L_2$ 、 $v_{2,j}$ 、 $x_{2,j}(k)$ 、 $\mu_{2,j}$  をいずれも定数とした。表 1 に示すようにセッション 2 のトラフィック量を時刻によって変動させ、セッション 1 の経路ごとのトラフィック量  $T_1(k)$ 、総トラフィック量  $T_1$ 、および平均アクティビティ  $\mu_i = \sum_j^{L_i} \mu_{i,j} / L_i$  の変化を評価する。

##### 4.2 シミュレーション結果

セッション 1 がそれぞれの経路に流すトラフィック量  $T_1(k)$  の変化を図 4 に、総トラフィック量  $T_1$  の変化を図 5 に、平均アクティビティ  $\mu_i$  の変化を図 6 にそれぞれ示す。

図 4 より、シミュレーション開始から 300 秒後、600 秒後、900 秒後、1200 秒後、1500 秒後において、バックグラウンドトラフィックの変動に伴い、セッション 1 がそれぞれの経路に流すトラフィック量が適応的に変化していることがわかる。

セッション 1 はシミュレーション開始から時刻 300 秒まで、それぞれの経路の容量制限  $x_{lim,1}(k)$  に応じたトラフィックを送出している。時刻 300 秒でそれぞれの経路にトラフィック量  $\sum_{j=1}^{L_2} v_{2,j} x_{2,j}(k) = 0.05, 0.15, 0.3$  のバックグラウンドトラフィックが流入することにより、セッション 1 のトラフィック量  $T_i(k)$  がおよそ 0.75, 0.65, 0.5 にそれぞれ減少している。その結果、図 5 に示されるセッション 1 の総トラフィック量はおよそ 1.9 に低下している。これは、式 (10) にもとづく通信効率の低下によって式 (9) により経路ごとのトラフィック配分が変化するとともに、式 (12) のシグモイド関数によってトラフィック量が抑制されることによる。

同様に、時刻 600 秒でのバックグラウンドトラフィックの経路配分の変更、時刻 900 秒でのバックグラウンドトラフィックのトラフィック量の増加などにもセッション 1 は適応的に動作し、それぞれの経路の負荷状態に応じてトラフィックを配分している。

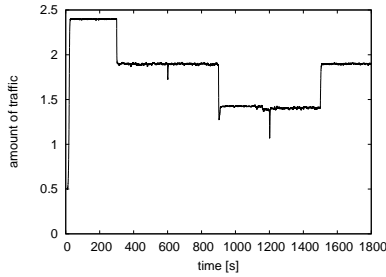


図5 総トラフィック量  $T_1$  の変化

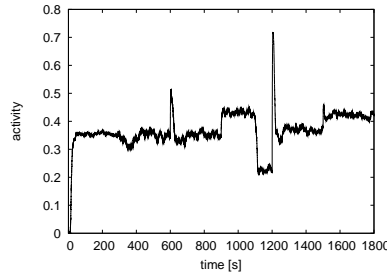


図6 平均アクティビティ  $\mu_1$  の変化

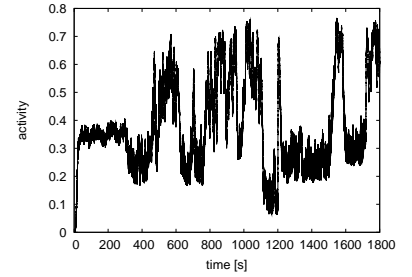
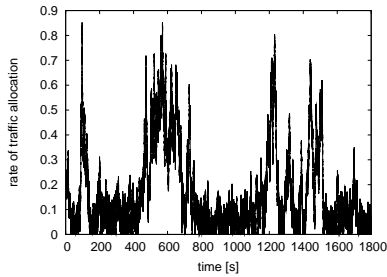
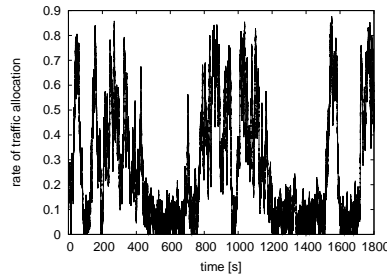


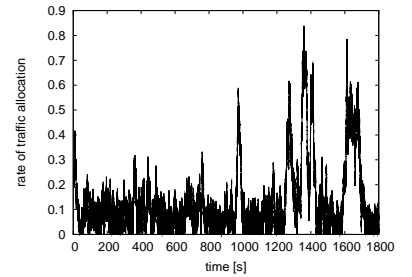
図7 アクティビティ  $\mu_{1,1}$  の変化



(a)  $x_{1,1}(1)$  の変化



(b)  $x_{1,1}(2)$  の変化



(c)  $x_{1,1}(3)$  の変化

図8 マイクロトラフィック 1 のトラフィック配分  $x_{1,1}(k)$  の変化

このような適応的制御においては、それぞれのマイクロトラフィックが通信効率を高めるために適応的に動作するため、図6に示される、平均アクティビティ  $\mu_i$  の変化は大きくないが、適応的な振る舞いは、個々のマイクロトラフィックレベルでは顕著にあらわれている。

図7にマイクロトラフィック 1 のアクティビティ  $\mu_{1,1}$  の変化を、図8に経路ごとのトラフィック配分  $x_{1,1}(k)$  の変化をそれぞれ示す。図に示されるとおり、バックグラウンドトラフィックがない状態では、マイクロトラフィック 1 の経路 2 へのトラフィック配分が比較的大きい。時刻 300 秒にバックグラウンドトラフィックが流入することにより、アクティビティ  $\mu_{1,1}$  が低下し、経路 2 へのトラフィック配分が減少している。その後、ノイズ項の影響により、時刻 400 秒付近で経路 1 へのトラフィック配分が増加している。経路 1 のバックグラウンドトラフィック量は小さいため、アクティビティが向上し、新たな負荷変動が生じる時刻 600 秒以降まで、経路 1 のトラフィック配分が大きい状態に安定している。このように、バックグラウンドトラフィックによる経路の負荷状態の変動にともなってマイクロトラフィック 1 のトラフィック配分は適応的に変化するが、ノイズ項、および他のマイクロトラフィックの振る舞いの影響を受けるため、必ずしも環境変化に即応するわけではなく、また、マイクロトラフィック単位で最適なトラフィック配分になるわけではない。

## 5. おわりに

本稿では、アトラクタ選択モデルにもとづくことにより、経路の負荷変動に対して適応的にトラフィック量を変更するオーバーレイマルチパス経路制御手法を提案し、シミュレーションによ

りその有効性を示した。今後は、複数のオーバーレイネットワークが部分的に物理リンクを共有する場合について、提案手法の有効性を検証する。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費) の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 文献

- [1] M. Seshadri and R. Katz, "Dynamics of simultaneous overlay network routing," Tech. Rep. UCB//CSD-03-1291, EECS, Nov. 2003.
- [2] L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, "On selfish routing in Internet-like environments," in *Proceedings of the 2003 conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, pp. 151–162, Aug. 2003.
- [3] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, "Resilient multi-path routing based on a biological attractor-selection scheme," in *Proceedings of the Second International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006)*, pp. 48–63, Jan. 2006.
- [4] 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*, vol. 1, p. e49, Dec. 2006.
- [5] H. Xie, Y. R. Yang, A. Krishnamurthy, Y. Liu, and A. Silberschatz, "P4P: Provider portal for applications," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 4, pp. 351–362, 2008.
- [6] I. Stoica, D. Adkins, S. Zhuang, S. Shenker, and S. Surana, "Internet indirection infrastructure," in *Proceedings of the 2002 SIGCOMM conference*, pp. 73–86, Oct. 2002.