

## アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法の性能評価

南 勇貴<sup>†</sup> 小泉 佑揮<sup>†</sup> 荒川 伸一<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: †{y-minami,ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**あらまし** P2P ネットワーク、VoIP、動画配信サービスなどの新たなサービスが登場し、ネットワーク上でのトラフィックの変化は非常に大きくなっている。現在トラフィックを WDM ネットワーク上に効率的に收容するための仮想網制御に関する研究が数多くなされているが、トラフィックの変化に対して適応的に仮想網を制御する仮想網制御手法が重要となってきた。本稿では、ネットワークの環境変化への適応性を目的とし考案された、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法の性能評価を行った。計算機シミュレーションによってアトラクタ選択を用いた仮想網制御手法と既存の仮想網制御手法を比較し、最大リンク利用率を指標としてその性能を評価した。性能評価の結果、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法では、既存の仮想網制御手法と比べ、2 倍程度の大きさのトラフィック変動に対して制御可能となり、より大きなトラフィック変動に適応しリンク利用率を改善することが可能であることがわかった。また、リンク利用率改善に必要な制御回数は、既存の仮想網制御手法の十分の一程度となることが明らかとなった。

**キーワード** WDM (Wavelength Division Multiplexing), IP (Internet Protocol), 論理トポロジ設計, 仮想網制御, 遺伝子ネットワーク, アトラクタ選択

## Evaluation of virtual topology controls using an attractor selection model

Yuki MINAMI<sup>†</sup>, Yuki KOIZUMI<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871  
Japan

E-mail: †{y-minami,ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In recent years, the Internet accommodates various kinds of traffic generated by new applications, such as P2P, VoIP, and video streaming services. Since traffic of these applications gives impacts on the performance in the network, an adaptability against changes of traffic becomes one of important characteristics. To achieve the adaptability, we have proposed a method for virtual topology controls using an attractor selection model. In this paper, we investigate the adaptability of our virtual topology control via computer simulations. Simulation results indicate that our virtual topology control can successfully adapt changes of traffic around twice higher variance comparing with conventional virtual topology controls. We also demonstrate that our virtual topology control achieves one-tenth of control duration.

**Key words** WDM (Wavelength Division Multiplexing), IP (Internet Protocol), virtual topology configuration, virtual topology control, gene network, attractor selection

### 1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) ネットワークは、光パスと OXC (Optical Cross-Connect) から構成されるネットワークであり、波長ルーティングを用いて仮想的なトポロジ (仮想網) を構築することで IP (Internet Protocol) トラフィックを收容する。近年、トラフィックを WDM ネットワーク上に効率的に收容するための仮想網制御に関する研究が数多くなされている。例えば、文献 [1] では、ノード間のトラフィック量 (以降、トラフィックデマンドマトリクスと呼ぶ) を事前に計測

することで取得し、そのノード間のトラフィックを効率良く收容するために、仮想網におけるリンク利用率の最小化を目指した仮想網設計手法が提案されている。

しかし、近年のインターネットでは、オーバーレイネットワークなどの新たなサービスの登場により、ネットワーク上でのトラフィックデマンドの変化が大きくなることが指摘されている [2,3]。文献 [2] では、オーバーレイネットワークと既存のトラフィックエンジニアリングとの相互作用によって、トラフィックデマンドなどのネットワークの状態が大きいかつ不規則に変化することが示されている。トラフィックデマンドの変化が大きい

場合、長期的な計測によりトラヒックデマンドマトリクスを取得し仮想網を設計する手法では、トラヒックを効率良く収容することはできない。そのため、トラヒックデマンドの変化に対して適応的に仮想網を制御する仮想網制御手法が必要である。

トラヒックデマンドの変化に適応し、トラヒックを効率的に仮想網上に収容するためのアプローチとして、2つの方式が考えられている。1つは、事前に取得した複数のトラヒックデマンドマトリクス、もしくは、トラヒックデマンドの変化の予測に基づき、仮想網を静的に構築するアプローチ（オフライン型制御）である [4]。このアプローチでは、トラヒックデマンドの変化は既知であるとして、変化後のトラヒックデマンドマトリクスは仮想網を構築する前に利用可能である、もしくは、トラヒックデマンドの変化は予測可能であると仮定している。そのため、仮想網はある特定のトラヒックデマンドマトリクスの集合に対して最適化されており、想定外のトラヒックデマンドの変動に対応することはできない。

一方、定期的なネットワークの計測、および、仮想網上の性能劣化の検出にもとづき仮想網を動的に再構成する方式（オンライン型制御）が考えられている [5]。このアプローチでは、オフライン型制御とは異なり、変動したトラヒックに応じて仮想網を再構成することで、トラヒックデマンドの変動に適応することができる。

しかし既存のオンライン型仮想網制御の多くは、周期的かつ緩やかなトラヒックデマンドの変動を仮定しており、文献 [2], [3] で指摘されている現象が生じると、仮想網上のトラヒックデマンドの変動がより大きくかつ予測困難な変化をするため、様々なトラヒックの変動に適応できる仮想網制御の開発が必要である。このような急激なトラヒックデマンドの変化にも適応できる仮想網制御を実現するために、現在オンライン型制御の一つとして、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法が研究されている（以下、アトラクタ制御と呼ぶ）。

アトラクタ制御では既存の手法で用いられているルールベースな方法ではなく、ノンルールベースな方法を用い、それにより環境の変化に対して頑強な仮想網制御を実現している。アトラクタ制御は環境変化に対する適応性を備えた生物振る舞いに着目しており、文献 [6] で示されるような生物が未知の環境変化に適応し生物の状態を回復する振る舞いをモデル化したアトラクタ選択を応用している。

アトラクタ選択の基礎となる概念は、システムがゆらぎと確定的な振る舞いによって駆動され、それらの2つの振る舞いがシステムの状態を示すフィードバック値によって制御される点である。既存のルールベースな方法では、想定外の環境変化に適応できないのに対して、アトラクタ選択はゆらぎによって駆動するため、未知の環境変化に対して適応する能力がある。アトラクタ制御ではその特徴を利用し、トラヒックデマンドマトリクスを用いずに、トラヒックデマンドマトリクスよりも情報量が少ないものの、SNMP（Simple Network Management Protocol）により直接取得可能なリンク利用率のみを用いて仮想網を制御し、環境変化に対してより早く反応し適応することができる仮想網制御を実現している。

文献 [7,8] では、アトラクタ制御を用いることでトラヒック変

動やリンク障害などのネットワーク環境の変化に適応的に動作することが示されている。しかし、そこではいくつかのシミュレーション条件での評価にとどまっており、アトラクタ選択を用いた仮想網制御を広く適用するためには、どの程度のネットワーク環境の変化に対応できるのか、また、どの程度の規模のトポロジーに対して適用できるのかを明らかにする必要がある。本稿では、WDM ネットワークにおける仮想網制御にアトラクタ制御を適用した際の性能を、様々な条件で評価する。

本稿の内容は以下の通りである。まず2.においてアトラクタ選択の概念とアトラクタ選択を仮想網制御に適用する際の詳細を述べ、3.において性能評価で用いるネットワーク環境とシミュレーション結果に関して述べる。最後に4.において本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. アトラクタ選択を用いた仮想網制御

本章では、文献 [6] に示されている生物システムの振る舞いをモデル化した遺伝子制御ネットワークおよびアトラクタ選択について簡単に述べる。次に、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法を説明する。

### 2.1 遺伝子制御ネットワークとアトラクタ選択

細胞内では遺伝子により構成される遺伝子ネットワークと、遺伝子ネットワークにより制御される代謝ネットワークが存在する。遺伝子ネットワーク上の各遺伝子は、タンパク質の発現レベルと呼ばれる値を持ち、遺伝子は相互に影響を及ぼし、活性、抑制し合いながら発現レベルを制御している。文献 [6] では、活性・抑制の関係から規定されるアトラクタ（安定状態）を持つ制御構造、システムが円滑に動いているかどうかを示す指標である活性度、および、ゆらぎにより生物システムを制御するアトラクタ選択が考案されている。

アトラクタ選択では、代謝が促進されているかを示す成長レートを遺伝子制御ネットワークにフィードバックし、代謝が円滑に行われている場合は、アトラクタを持つ制御構造がシステムの挙動を支配的に制御し、システムの状態は強くアトラクタに引きつけられる。しかし、環境変化により成長レートが減少すると、ゆらぎによりシステムが制御され、より成長レートが高くなるアトラクタに収束する。このように、アトラクタ選択は環境変化に対する生物システムの適応性をモデル化している。

### 2.2 アトラクタ選択を用いた仮想網制御の概要

我々は、トラヒックの変動などの環境変化によってIPネットワークの性能が劣化した場合に、WDM ネットワークにおいて、柔軟かつ適応的に仮想網を再構築して、劣化した性能を回復させることを目的としたアトラクタ選択にもとづいた仮想網制御手法を考案している [7,8]。アトラクタ選択にもとづいた仮想網制御手法では、2.1 節の遺伝子ネットワークをWDM ネットワーク、代謝ネットワークをIP ネットワークにそれぞれ対応づけ、IP ネットワークの性能をフィードバックしWDM ネットワークを制御しており、その制御の流れは以下の通りである。

1. 定期的にIPネットワークのリンク負荷を計測する
2. 計測したリンク負荷から成長レートを決定する。アトラクタ

制御はこの成長レートにより IP ネットワークが円滑に動いているかどうかを判断する。なお、アトラクタ制御における成長レートに関しては 2.5 節で詳細を述べる

3. 成長レートをもとに、アトラクタによる制御とゆらぎによる制御を決定し、システムの状態を制御する
4. 決定されたシステムの状態を元に仮想網を構築する。システム状態の決定方法については 2.3 節で詳細を述べる
5. IP ネットワークでは、その仮想網を使いトラヒックの転送を行う。仮想網の構造やトラヒックデマンドの変化によりリンク負荷が変化する
6. 再びリンク負荷を計測し、制御を行う

### 2.3 仮想網制御における相互作用

以降では、アトラクタ選択にもとづく仮想網制御手法を詳細に述べる。以降の説明では、 $i, j, s, d$  をノードのインデックス ID とし、ノード  $i$  を始点とし  $j$  を終点とするノードペアの ID を  $p_{ij}$  と表記する。

アトラクタ選択における遺伝子を物理トポロジの各ノードペアに置く。以降でも同様に、この制御単位を遺伝子と記述する。遺伝子は、互いに活性、抑制の相互作用をおよぼしながら、発現レベルを決定する。ここでは遺伝子の発現レベルによって、ノードペアに設定する光パスの数を決定する。このとき、発現レベルの高いノードペアにより多くの光パスを設定する。

ノードペア  $p_{ij}$  の遺伝子の発現レベル  $x_{p_{ij}}$  の相互作用の関係を、以下の微分方程式によって定義する。

$$\frac{dx_{p_{ij}}}{dt} = v_g \cdot f \left( \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - v_g \cdot x_{p_{ij}} + \eta \quad (1)$$

ここで、 $\eta$  はホワイトガウシアンノイズ、 $f(z)$  はシグモイド関数、 $v_g$  は成長レートであり、シグモイド関数とは以下の形で定義される関数である。

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-\mu z}} \quad (2)$$

アトラクタ制御の目的は、リンク利用率の最小化などの最適性ではなく、環境変化に対する適応性を実現することである。しかし、達成しうる性能を無視しているわけではなく、少なくとも、既存のヒューリスティックな制御手法と同等の性能を実現するために、 $\theta_{p_{ij}}$  をリンク負荷に応じて動的に設定することで、ノードペアに設定する光パスの数を制御する。ノードペア  $p_{ij}$  の光パス数は、 $x_{p_{ij}}$  に応じて決定し、 $x_{p_{ij}}$  が高いノードペアには、低いノードペアより多くの光パスを設定する。光パス数の決定の詳細に関しては 2.6 節で述べる。ここで、式 (1) において、 $x_{p_{ij}}$  の増加、および減少は、シグモイド関数  $f(z)$  の項によって制御することができる。

$z_{p_{ij}} = \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}}$  とし、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$  を考える。シグモイド関数の曲線は、 $z_{p_{ij}} = \theta_{p_{ij}}$  を中心とした増加曲線である。 $\theta_{p_{ij}}$  を小さくすると、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$  が  $z_{p_{ij}}$  に関して負の方向に移動する。そのため、同じ  $z_{p_{ij}}$  であっても、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$

が取る値が大きくなる。このとき  $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$  は、 $x_{p_{ij}}$  の増加速度であるため、 $x_{p_{ij}}$  が大きくなる。仮想網制御では、 $x_{p_{ij}}$  の増加はノードペア  $p_{ij}$  の光パスを増加させる制御に相当する。逆に、 $\theta_{p_{ij}}$  を大きくすると、 $x_{p_{ij}}$  の増加速度が減少するため、結果として、光パス数を減らす制御になる。このように、 $\theta_{p_{ij}}$  を動的に設定することで、光パスの数を制御することができる。 $\theta_{p_{ij}}$  を設定する指標として、リンク上のトラヒック量を用いる。しかし、 $\theta_{p_{ij}}$  は  $x_{p_{ij}}$  の変化に大きな影響を与えるため、計測したリンク上のトラヒック量を直接用いると、計測値の振動が直接仮想網制御に反映され、仮想網制御が振動する。そこで、計測値の振動が VNT 制御に与える影響を軽減するために、平滑化計数を 0.5 とした指数移動平均をとったリンク  $l_{p_{ij}}$  上のトラヒック量  $y_{p_{ij}}$  を用いる。 $y_{p_{ij}}$  が大きいノードペアにより多くの光パスを設定するために、 $y_{p_{ij}}$  が大きいノードペアの  $\theta_{p_{ij}}$  を小さくし、 $x_{p_{ij}}$  を増加させる。 $y_{p_{ij}}$  の最小値を  $y_{\min}$  最大値を  $y_{\max}$  とし、 $\theta_{p_{ij}} = -(y_{p_{ij}} - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \times 2\theta^* + \theta^*$  とすることで  $[-\theta^*, \theta^*]$  の範囲で  $\theta_{p_{ij}}$  を変化させる。ただし、ノードペア  $p_{ij}$  上にリンクが存在しない場合は、仮想網を緩やかに変化させるために、 $y_{p_{ij}} = y_{\min}$  とする。

### 2.4 制御行列

各遺伝子は、他の遺伝子と活性・抑制の相互作用を及ぼし合いながら、 $x_{p_{ij}}$  を決定する。遺伝子  $p_{sd}$  が遺伝子  $p_{ij}$  を活性化することは、ノードペア  $p_{sd}$  がノードペア  $p_{ij}$  の光パス設定数を増加させることに相当し、逆に抑制することは光パス数を減少させることに相当する。本稿では、トラヒックエンジニアリングおよび光ネットワークの物理的制約から光パス設定の活性関係・抑制関係を規定し、アトラクタ選択で用いる制御構造を決定する。

- 他の光パスへのトラヒックの迂回

光パスの設定に関する事象として他の光パスに流れているトラヒックを迂回させることが考えられる。あるノードペア  $p_{ij}$  に光パスを設定すると、その光パスの始点から終点へ流れるトラヒックは、新たに設定した光パス上を流れる。そのトラヒックが  $p_{ij}$  に光パスを設定する前に流れていた光パスの候補の 1 つとして、ノード  $i$  から  $j$  への物理トポロジ上での経路に相当するノードペアに設定されている光パスがある。そこで、ノード  $i$  から  $j$  への物理トポロジ上での経路上に存在するノードペアは  $p_{ij}$  を活性する

- IP の経路によるリンク（光パス）の共有

IP ネットワークのある経路が、ノードペア  $p_{ij}$  と  $p_{sd}$  の光パスを経由している場合を考える。この場合、 $p_{ij}$  上のトラヒックの一部は、 $p_{sd}$  上にも流れる。そのため、 $p_{ij}$  の光パス設定数を増加させた場合は、 $p_{sd}$  の光パスの設定数も同時に増加させることで、トラヒックを効率的に転送することができる。これを活性化の関係によって表現する。IP ネットワークの経路はアトラクタ制御によって構築された仮想網によって変化するため、その経路によって制御行列を定義すると、制御行列が計算ごとに変化し、アトラクタ選択が安定しないと考えられる。そこで、IP ネットワークの経路として、物理トポロジと同じ形状とした初期トポロジ上の経路を利用する

- 光パスによる光ファイバの共有

あるファイバを複数の光パスで共有している場合、ある光パスに割り当てる波長数を増やしたときには他の光パスの資源量を減少させる必要がある。したがって、この関係を抑制化の関係として表現する

これら活性、抑制の関係は制御行列  $W(p_{ij}, p_{sd})$  を用いて表現する。 $W(p_{ij}, p_{sd})$  は以下の通りに定義する。

$$W(p_{ij}, p_{sd}) = \begin{cases} \alpha_A & \text{if gene } p_{ij} \text{ is activated by gene } p_{sd} \\ \alpha_I & \text{if gene } p_{ij} \text{ is inhibited by gene } p_{sd} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

正の定数  $\alpha_A$ 、負の定数  $\alpha_I$  は、それぞれ、活性、抑制の関係の強さを表す定数である。各遺伝子が他の遺伝子から受ける活性と抑制の関係の総量  $z_{p_{ij}} = \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd})$  は、式(1)に固有の値であり、遺伝子数とは独立した値である。これは、適切な  $z_{p_{ij}}$  の範囲は、シグモイド関数  $f(z_{p_{ij}})$  によって決定されるためである。様々な環境変化に対して、適応的に動作する仮想網制御を実現するためには、式(1)が多くの均衡点、すなわちアトラクタを持つ必要がある。この多くのアトラクタから、周囲の環境に応じたアトラクタを選択することで、環境変化に対する適応性を実現することができる。アトラクタ制御においては、ノードペア数を  $N$ 、 $W(p_{ij}, p_{sd}) = \alpha_A$  となるノードペア数を  $N_A$ 、 $W(p_{ij}, p_{sd}) = \alpha_I$  となるノードペア数を  $N_I$  とすると、定数  $\alpha_A$ 、 $\alpha_I$  をそれぞれ  $\alpha_A = 1.08N/N_A$ 、 $\alpha_I = -1.08N/N_I$  とし、遺伝子間の活性、抑制の強さを決定している。

## 2.5 成長レート

最適化を目指す IP ネットワークの指標として最大リンク利用率を用い、IP ネットワークからアトラクタ制御へフィードバックする成長レート  $v_g$  を決定する。

$y_{p_{ij}}$ 、 $C_{p_{ij}}$  をそれぞれリンク  $l_{p_{ij}}$  上のトラヒック量とリンク  $l_{p_{ij}}$  のキャパシティ ( $p_{ij}$  の光パス数と光パスの帯域の積) とすると、 $l_{p_{ij}}$  の利用率は  $u_{p_{ij}} = y_{p_{ij}}/C_{p_{ij}}$  となる。IP ネットワーク上の最大リンク利用率を  $u_{max} = \max_{p_{ij}}(u_{p_{ij}})$  とする。 $u_{max}$  を用いて  $v_g$  を以下の通りに定義する。

$$v_g = \begin{cases} \frac{\gamma}{1+\exp(\delta \cdot (u_{max}-\zeta))} & \text{if } u_{max} \geq \zeta \\ \frac{\gamma}{1+\exp(\delta' \cdot (u_{max}-\zeta))} & \text{if } u_{max} < \zeta \end{cases} \quad (3)$$

$\gamma$  は定数であり、 $v_g$  の値域は  $[0, \gamma]$  となる。 $\zeta$ 、 $\delta$ 、 $\delta'$  も定数であり、 $v_g$  は最大リンク利用率が  $\zeta$  以下であれば強く 100 に近づけ  $\zeta$  以上であれば 0 に近づけていく。そのときの傾きは  $\delta$ 、 $\delta'$  によって調整し、 $\delta$ 、 $\delta'$  が大きいほど傾きが急になる。最大リンク利用率  $u_{max}$  が  $\zeta$  より大きい場合は、仮想網の性能が悪いと見なし、 $v_g$  を 0 に近づけ、ゆらぎによりアトラクタ制御は新たなアトラクタを探索する。一方、 $u_{max}$  が  $\zeta$  よりも小さくなるにつれて、 $v_g$  を増加させ、式における確定的な制御項が仮想網制御を抑制し、アトラクタに収束するように制御を行う。このとき、 $u_{max}$  が  $\zeta$  に近いほど  $u_{max}$  の変化量に対する  $v_g$  の変化量を大きくすることで、 $u_{max}$  が十分低い領域では安定的な制御を行い、 $u_{max}$  が中程度の領域では、 $u_{max}$  の改善を図る。

## 2.6 ノードペア間の光パス数

アトラクタ制御では各ノードペアに設置した遺伝子  $p_{ij}$  が発

現レベル  $x_{p_{ij}}$  を持ち、 $x_{p_{ij}}$  に基づいてノードペア  $p_{ij}$  の光パス数  $G_{p_{ij}}$  を決定する。ここでは、ファイバ上で利用可能な波長数は十分にあり、ノードのトランスミッタ数  $P_T$  とレシーバ数  $P_R$  がノードペア間の光パス数を制約するものとする。

ノード  $i$  に関して、そのノードのトランスミッタを利用するノードペアの  $x_{p_{id}}$  の総和に対する、 $x_{p_{ij}}$  の比に応じて、 $p_{ij}$  に利用可能な光パス数を割り当てる。レシーバでも同様に、光パス数を割り当てる。これにより  $x_{p_{ij}}$  の高いノードペアに多くの光パスを割り当てることができる。ノードペア  $p_{ij}$  の光パス数  $G_{p_{ij}}$  は、以下の式で決定する。

$$G_{p_{ij}} = \min \left( \left\lfloor P_R \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_s x_{p_{sj}}} \right\rfloor, \left\lfloor P_T \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_d x_{p_{id}}} \right\rfloor \right) \quad (4)$$

この際、実数値から整数値へのマッピングに floor 関数を用いているため、利用可能なポートを全て使い切ることにはできない。そこで、 $x_{p_{ij}}$  の高いノードペアから順に、利用可能な全ポートを利用するまで、1本ずつ光パスを追加する。

また、他の制約があった場合、例えば波長数に関する制約があった場合でも同様に容易に光パス数を決定することができる。例えばファイバ上で利用可能な波長数の制約は、同じファイバを利用する他の全てのノードペアの発現レベル  $x_{p_{ij}}$  の比を取ることで、満たすことができる。

## 3. 性能評価

本章ではアトラクタ制御と他の制御手法との性能評価の環境と、性能評価の結果を述べる。

### 3.1 比較手法

比較手法として文献 [5] で書かれている適応性を目的としたヒューリスティックな仮想網制御手法であるアダプティブ制御を用いる。

アダプティブ制御ではネットワークのリンク利用率の許容範囲の上限  $W_H$  と下限  $W_L$  を設定し、計測したリンク利用率が許容範囲外であった場合、仮想網の変更を行う。ネットワークのリンク利用率は定期的に計測され、リンク利用率とそれを用いて推定されたトラヒックデマンドマトリクスを基に制御を行う。またパスの設定は 1 回の制御で 1 本ずつ行われる。制御の流れは以下ようになる。

- Step.1: リンク利用率を計測し、最大リンク利用率と最小リンク利用率を求める
- Step.2: あるノードペア間のトラヒックが 0 より大きく、光パスを持たないならば、光パスを設定する。トラヒックが 0 より大きい全てのノードペアに既に光パスが設定されていれば Step3 の処理に移る
- Step.3: 計測した最大リンク利用率が  $W_H$  を超えている場合、最大リンク利用率を示すリンクを経路として持つノードペアの中で最もトラヒックの大きいペアに新たな光パスを追加する。最大リンク利用率が  $W_H$  を超えていなかった場合は Step4 の処理に移る
- Step.4: 最小リンク利用率が  $W_L$  を下回っている場合、最

小リンク利用率を示すリンクを経路として持つノードペアの中でも最もトラヒックが小さいペアの光パスを削除し制御を終了する。ただしそのパスがノードペアを結ぶ唯一のパスである場合は次にトラヒックの小さいペアに同様の処理を行う

以上のようにしてアダプティブ制御は仮想網を構築する。

### 3.2 評価環境

各制御手法の性能をシミュレーションプログラムを用いて評価した。物理トポロジには 19 ノード 38 リンクの EON (European Optical Network) トポロジ [7] を用いた。各ノードにはトランスミッタおよびレシーバが 8 個あるものとし、本稿ではファイバにおける波長多重数については考えないものとする。

環境変化として、IP ネットワークのトラヒックデマンドの変動を考える。本評価では、現実のトラヒックデマンドを用いた際の性能を評価するのではなく、トラヒックデマンドの変動の大きさに対するアトラクタ制御の性能を評価するため、トラヒック変動は時刻 500 でのみ起こり、それ以外の時刻ではトラヒックデマンドは変化しないものとする。各ノードペアのトラヒックデマンド  $d_{p_{ij}}$  は平均 1、分散  $\sigma^2$  の対数正規分布に従い、 $\sum_{p_{ij}} d_{p_{ij}}$  が一定となるように決定する。

アトラクタ制御は SNMP により 5 分に 1 回リンク利用率を取得し仮想網を制御するものとし、式 (3) の成長レートの定数を、 $\gamma = 100$ 、 $\delta = 13$ 、 $\delta' = 3$ 、 $\zeta = 0.5$  とする。式 (2) における  $\mu$  を 1 とし、式 (1) における  $\eta$  を平均 0、偏差 0.2 の正規分布に従う乱数としている。また、 $\theta_{p_{ij}}$  の変化する範囲である  $\theta^*$  を 2.0 とする。性能比較対象には、適応性を目的としたヒューリスティックな手法として 3.1 節で述べたアダプティブ制御を用いる。アダプティブ制御では、5 分に 1 回リンク利用率を取得し、リンク利用率より tomogravity 法 (文献 [9]) を用いてトラヒックデマンドマトリックスを推定し、リンク利用率とトラヒックデマンドマトリックスを用いて仮想網の再構築を行うものとし、 $W_H = 0.5$ 、 $W_L = 0.1$  とする。

図 1 は、物理トポロジを EON トポロジ、 $\sigma^2 = 2.0$  とし、時刻 0 においてトラヒックの初期値を決定し、時刻 500 においてトラヒック変動が生じたときの各時刻における最大リンク利用率を示している。図においてアトラクタ制御による仮想網制御を適用したときの結果は“Attractor”であり、アダプティブ制御による仮想網制御を適用したときの結果が“Adaptive”である。いずれの制御手法においても、時刻 0 における制御の開始とともに最大リンク利用率が低下する。また、時刻 500 でトラヒック変動が生じると、最大リンク利用率が一時的に増加するものの、時刻経過とともに最大リンク利用率が低下することが分かる。

このように、様々な条件でシミュレーションを実行した時の最大リンク利用率の変化により仮想網制御の性能を評価する。

### 3.3 評価結果

まず、物理トポロジを EON トポロジを用いた際のアトラクタ制御による仮想網制御の性能評価を行う。 $\sigma^2$  を 0 から 2.4 の範囲で 0.1 刻みで変化させ、各分散値に対して乱数を変化させて 100 回のシミュレーションを実行した。

図 2 は、トラヒック変動に対して各制御手法を適応し、時刻

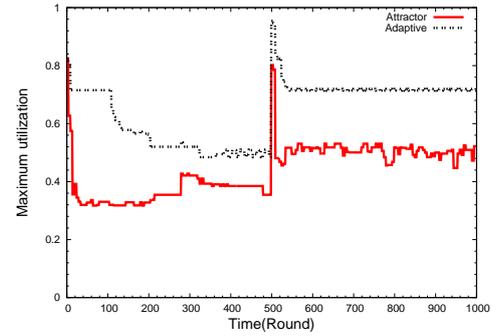


図 1 最大リンク利用率の時間変化

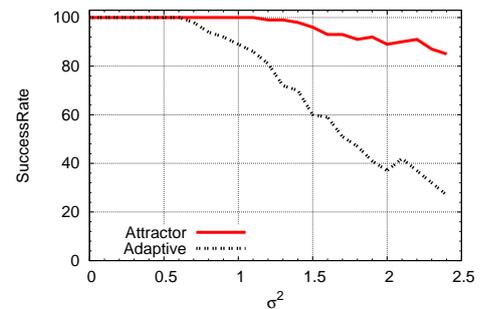


図 2 EON トポロジにおける制御の成功率

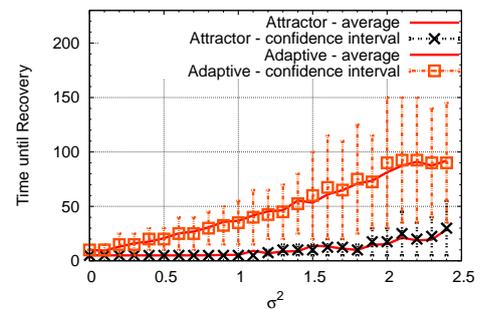


図 3 EON トポロジにおける回復時間の平均値と 90 %信頼区間

1000 までに最大リンク利用率が 0.5 以下に下がったときに制御が成功したものとし、500 分以内に最大リンク利用率を 0.5 以下に下げることができなかったときは制御に失敗しトラヒック変動に適応できなかったとした時の、各分散値に対しての制御成功率を示したものである。横軸が  $\sigma^2$ 、縦軸が成功率としている。この図から、アダプティブ制御は  $\sigma^2 = 0.6$  までは 100 % 制御に成功しているが、 $\sigma^2$  が 0.7 以上になると制御の失敗が起り始め、 $\sigma^2$  が大きくなるにつれて制御の成功率は大きく下がり、 $\sigma^2$  が 2.4 の場合には成功率は 30 % 以下となっていることがわかる。それに対しアトラクタ制御では  $\sigma^2 = 1.1$  まで 100 % 制御に成功しており、 $\sigma^2$  が 2.4 の場合でも 80 % 以上の制御成功率を維持していることがわかる。

次に、図 3、図 4 を示す。図 3 は制御に失敗した場合のデータを除き、トラヒック変動が起こってから制御に成功しネットワークの状態が回復するまでにかかった時間の平均値と 90 % 信頼区間を示したものであり、図 4 は同様に制御に失敗した場合のデータを除き、トラヒック変動が起こってから制御に成功し

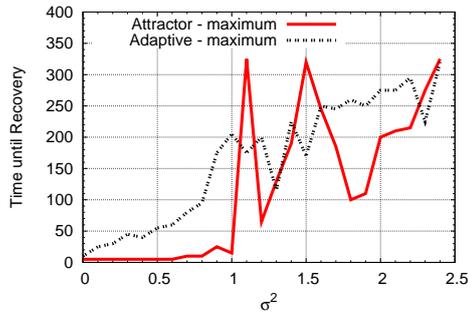


図4 EONトポロジにおける回復時間の最大値

ネットワークの状態が回復するまでにかかった時間の最大値を示したものである。それぞれ横軸が $\sigma^2$ 、縦軸が回復までの時間となっている。

図3において、最大リンク利用率が0.5以下になるまでの平均時間に着目すると、 $\sigma^2$ が0付近の場合はアトラクタ制御、アダプティブ制御ともに差がなく、数回の制御で変化に適応し回復している。しかし $\sigma^2$ が大きくなるとアトラクタ制御、アダプティブ制御に差が出始め、アトラクタ制御の方がより早くトラヒック変動に適応し回復していることがわかる。 $\sigma^2$ が大きくなるほどその差は大きくなり、 $\sigma^2$ が2.4の場合アトラクタ制御では30分程度で回復しているがアダプティブ制御では90分程度かかっている。次に90%信頼区間に着目する。まずアダプティブ制御を見ると、アトラクタ制御と比較して信頼区間が大きく、 $\sigma^2$ が2.4のときは30分から150分程度まで回復時間が大きくばらついていることがわかる。それに対してアトラクタ制御は比較的信頼区間が狭く、 $\sigma^2$ が2.4の場合でも5分から60分程度で回復している。

図4において、最大リンク利用率が0.5以下になるまでの時間の最大値に着目する。最大値では多くの $\sigma^2$ に対して、アトラクタ制御が下回っているが、 $\sigma^2$ が1.1、1.5の時のようにアトラクタ制御が大きく上回っているところがある。これは最大リンク利用率が大きくなった場合に、アトラクタ制御はゆらぎによって仮想網を制御するが、稀にゆらぎが上手く作用しなかった場合、回復までに非常に長い時間がかかるためである。これに関してはアトラクタ制御のパラメータを変更するなど改善される可能性がある。なお図2からわかるようにアダプティブ制御よりもアトラクタ制御の方が制御の成功率は高く、ゆらぎによって様々なトラヒック変動に適応できることがわかる。

この結果から回復までの最大値を見たときアダプティブ制御に比べてアトラクタ制御が大きく上回っている部分があったが、ほとんどの場合ではアトラクタ制御の方が上手く作用して早く回復しており、制御時間が長くなる場合はごくわずかであることがわかる。

なお、上記の傾向は、11ノード14リンクからなるabileneトポロジ[10]を用いた場合においても概ね同じであることを確認している。

#### 4. まとめと今後の課題

本稿では、トラヒック変動に対する適応性を備えた仮想網制御手法として、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法に着目

し、その適応性を計算機シミュレーションにより評価した。性能評価の結果、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法では、既存の仮想網制御手法と比べ、2倍程度の大きさのトラヒック変動に対して制御可能となり、より大きなトラヒック変動に適応しリンク利用率を改善することが可能であることがわかった。また、リンク利用率改善に必要となる制御回数は、既存の仮想網制御手法の十分の一程度となることを示した。また、物理トポロジが異なる場合においても同様の結果が得られており、アトラクタ選択を用いた仮想網制御は適応性が高いことが明らかとなった。

ただし、アトラクタ選択を用いた仮想網制御では、ゆらぎによる制御に起因して制御回数が増える事象が生じることも明らかとなった。本稿で用いたアトラクタ制御では、ゆらぎの大きさはネットワーク環境や制御回数に依存せず一定であるとしているが、例えば計測された最大リンク利用率に応じて、ゆらぎの大きさを変化させることで早くアトラクタ収束点を探索し、より早く環境の変化に適応させることも可能であると考えられる。今後は環境変化の大きさに応じたパラメータ設定方法を検討していく。

#### 謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)の支援により行われた。ここに記して謝意を示す。

#### 文 献

- [1] R. Ramaswami, K. Sivarajan, I. Center, and Y. Heights, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840–851, June 1996.
- [2] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proceedings of INFOCOM*, vol. 4, pp. 2543–2553, Mar. 2005.
- [3] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, "Stability of virtual network topology control for overlay routing services," *OSA Journal of Optical Networking*, vol. 7, pp. 704–719, July 2008.
- [4] F. Ricciato, S. Salsano, A. Belmonte, and M. Listanti, "Off-line configuration of a MPLS over WDM network under time-varying offered traffic," in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 57–65, June 2002.
- [5] A. Gencata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [6] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [7] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Application of attractor selection to adaptive virtual network topology control," in *Proceedings of BIONETICS*, Nov. 2008.
- [8] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Robust virtual network topology control based on attractor selection," in *Proceedings of ONDM*, Feb. 2009.
- [9] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 31, pp. 206–217, June 2003.
- [10] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2007*, pp. 2511–2515, May 2007.