

## ゆらぎ原理を用いた VNT 制御における アトラクター集合の更新手法の提案

坂本 昂輝<sup>†</sup> 大場斗士彦<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: †{k-sakamoto,t-ohba,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**あらまし** 我々の研究グループでは、トラヒック変動への適応性を有する VNT の制御手法として、制御状態の安定点を表すアトラクターとゆらぎによって駆動され、それらの 2 つの振る舞いが VNT 上の通信品質の状態を示すフィードバック値によって制御されるアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法を検討している。しかし、保持可能なアトラクター数には上限があるため、どのようなアトラクター集合を用意するかが制御性能を決定づける重要な設計対象となる。アトラクター集合を設計する手法に関する既存研究では、トポロジー特性が良く、かつトポロジー特性が互いに異なる VNT 候補をアトラクターとすることで良好な制御性能が得られることが示されている。しかし、既存手法はトポロジー特性に基づいてアトラクター集合を求める手法であり、現在のトラヒック環境に応じてアトラクター集合を定めるものではない。その結果、VNT 制御において良好な解を発見するまでの時間の増大をもたらす可能性がある。そこで本稿では、解発見までの時間を削減することを目的としたアトラクター集合の更新手法を提案する。提案手法では、トラヒック需要情報を用いたオフライン計算による評価によって、現在のトラヒック環境に対して適応的ではないアトラクターを一時的に除外し、環境に適したアトラクターをアトラクター集合に動的に組み入れる。計算機シミュレーションの結果、既存の手法により選定されたアトラクター集合を用いる場合と比較して、提案手法では解発見までの制御回数を最大約 60 %削減可能であることがわかった。

**キーワード** VNT (Virtual Network Topology) 制御、波長ルーティング、アトラクター選択、光ネットワーク設計、アトラクター集合、アトラクター更新、ゆらぎ原理

### A method for updating a set of attractors in Yuragi-based virtual network topology control

Koki SAKAMOTO<sup>†</sup>, Toshihiko OHBA<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: †{k-sakamoto,t-ohba,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Our research group has proposed a VNT control method based on attractor selection. Since the number of attractors composing an attractor set is limited, it is important to decide what kind of attractors should be prepared. The existing method prepares attractors such that their topological characteristics are different from each other. However, since the existing method does not incorporate current traffic information when designing attractors, it is likely that VNT control needs an additional step to find a good VNT. This paper therefore proposes a method for reducing the number of steps to find a solution. Our basic approach is to check each attractor to see whether it is adaptive under the current traffic demand or not through off-line simulations. Then, our method removes non-adaptive attractors and adds adaptive attractors from/to the attractor set. Evaluation results show that our method reduces the number of steps to find a solution by 60 %.

**Key words** VNT Control, Wave-length Routing, Attractor Selection, Designing Optical Networks, A set of Attractors, Attractor Update, Yuragi

## 1. はじめに

インターネットを流れる総トラフィック量は依然として増加しつづけており、今後もトラフィック量の増大が予想されている [1]。また、スマートフォンやタブレット端末などが普及し、様々な人が様々な形でインターネットを利用するようになった。その結果、トラフィック量増大への対応だけではなく、トラフィック需要の変動への対応が求められつつある。

トラフィック需要の変化に適應し、IP トラフィックを効率的に光ネットワークに收容するための通信形態として、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) を用いた WDM ネットワークにおいて、波長ルーティングを用いた仮想網 (VNT: Virtual Network Topology) の制御手法の研究がなされている [2], [3]。波長ルーティングは、光基盤ネットワークを構成する OXC (Optical Cross-Connect) で光信号レベルでの交換を行うことで、波長のチャネル (以降、光パス) をノード間に構築する。図 1 に示す IP over WDM ネットワークは、複数の光パスを用いて仮想的なトポロジーである VNT を構築し、その VNT 上に IP トラフィックを收容するものである。IP over WDM ネットワークにおいて、トラフィック変動に応じて VNT 上のトラフィックの通信品質が劣化する際に、VNT を動的に再構成する VNT 制御が検討されている [4]~[8]。

我々の研究グループでは、トラフィック変動への適應性を有する VNT の制御手法として、制御システムがゆらぎと決定的な振る舞いによって駆動され、それら 2 つの振る舞いが VNT 上の通信品質を示すフィードバック値によって制御されるアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法を検討している。トラフィ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対して、適應的に動作することを明らかにしてきた [9]。また、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法の計算量を削減し、より短い制御間隔で VNT を算出することが可能な VNT 制御手法を考案している。トラフィック需要を観測して通信品質が最適となる VNT を求める制御手法に対して、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、VNT の通信品質のみを計測している。そのため、より短い時間オーダーでのトラフィック変動や、未知のトラフィックに対して適應的に VNT を再構成することが可能となる。実機を用いた実証実験では、広域接続された 16 ノードの実験網を用いて、1 分周期での VNT 制御が可能であることを確認している [10]。

アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、システムの制御状態はアトラクターに引きつけられる。したがって、アトラクターとして保持するいずれかの VNT 候補が現在のトラフィックを收容可能であることが望ましい。しかし、保持可能なアトラクター数には上限があるため、どのようなアトラクターを用意するかが制御性能を決定づける重要な設計対象となる。文献 [9] では、ランダムに算出した VNT 候補をアトラクターとして用いている。文献 [11] では、アトラクター選定手法を提案し、ランダムに算出した VNT 候補をアトラクターとする場合と比較して、良好な解を発見するまでの時間が約 75 % 抑制されることが示されている。アトラクター選定手法の基本的な考

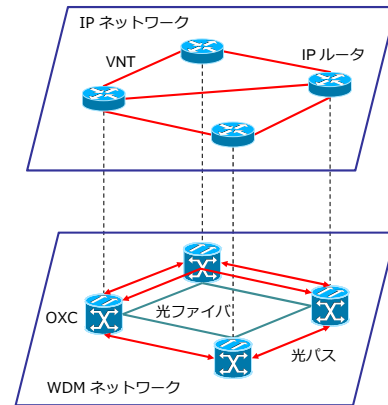


図 1 IP over WDM ネットワーク

え方は、トポロジー特性が良好で、かつトポロジー特性が互いに異なる VNT 候補をアトラクターとすることである。しかし、文献 [11] の手法は、トポロジー特性にもとづいてアトラクター集合を求める手法であり、現在のトラフィック量やトラフィックパターンに応じてアトラクターを定めるものではない。その結果、現在のトラフィック環境に適應的ではない VNT 候補をアトラクターとして保持し、良好な解を発見するまでの時間の増大をもたらすものと考えられる。そこで本稿では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御において解発見までの時間を削減することを目的とし、アトラクター集合の更新手法を提案する。

本稿の構成として、まず 2 章でアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法について述べ、3 章でアトラクター集合の更新手法を提案する。次に 4 章で現在のトラフィック需要情報と 3.3 章の手順に沿って求めたアトラクター集合を用いて、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の性能評価を行う。最後に、5 章で本稿のまとめと今後の課題について記述する。

## 2. アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法

本章では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法について説明する。以降では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御をゆらぎ制御と表記する。

### 2.1 動作概要

アトラクター選択は、アトラクターを持つ制御構造とゆらぎを活性度のフィードバックによって制御するゆらぎ原理を用いることで、環境変化に対する適應性を実現している。アトラクター選択によって駆動されるシステムの振る舞いは式 (1) で定義される。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot f(\mathbf{x}) + \eta \quad (1)$$

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  は、システムの状態である。関数  $f(\mathbf{x})$  がアトラクターを持つ制御構造であり、 $\eta$  がゆらぎである。システムの活性度を表すのは  $\alpha$  である。 $\mathbf{x}$  を構成する  $x_i, x_j (1 \leq i, j \leq n)$  は互いに影響を与える。その各々の影響を表したものを制御行列とよび、この制御行列により  $f(\mathbf{x})$  は決まる。活性度はシステムのコンディションが良いほど大きな値になる。システムのコンディションが良く、 $\alpha$  の値が大きい場合は、 $f(\mathbf{x})$  がシステムの挙動に与える影響が  $\eta$  に比べて相対的に大きくなるため、

$f(\mathbf{x})$  が支配的にシステムを制御する。そのため、 $\mathbf{x}$  は  $f(\mathbf{x})$  で定義される解空間上の均衡点であるアトラクターに安定的に収束する。また、システムのコンディションが悪く、 $\alpha$  の値が小さい場合は、 $\eta$  が支配的にシステムを制御する。このとき、ゆらぎがランダムにシステムの状態を変化させ、システムのコンディションが良くなるアトラクターを探索する。このようにして、アトラクター選択モデルは活性度の大小に応じてシステム状態のダイナミクスにおける、ゆらぎの影響を制御することで、環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現している。

アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、システムの状態  $\mathbf{x}$  を WDM ネットワークにおける VNT の設定状態とし、システムのコンディションの良さを表す活性度  $\alpha$  として、IP ネットワークの通信品質を用いる。

## 2.2 光パスの制御方法

アトラクター選択にもとづく VNT 制御では、光パス  $l_i$  の設定状況を状態変数  $x_i (\in \mathbf{x})$  の値によって決定する。状態変数  $x_i$  のダイナミクスは式 (2) で表される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left[ \varsigma \left( \sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right] + \eta \quad (2)$$

$\varsigma \left( \sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$  は決定的な動作を示し、式 (1) における  $f(\mathbf{x})$  に相当する。また、 $\varsigma(z)$  は、 $\varsigma(z) = \tanh(\frac{z}{2})$  で表されるシグモイド関数である。第 1 項はアトラクター構造を定義する制御行列  $W_{ij}$  を用いて計算され、 $W_{ij}$  はすべての光パスとの相互作用を示す。第 2 項の  $\eta$  は確率的動作を示すゆらぎ項である。

式 (2) で計算した状態変数  $x_i$  の値にしたがって、光パス  $l_i$  の設定状態を決定する。閾値を 0 とし、 $x_i \geq 0$  のときは  $l_i$  を 1、それ以外の時は 0 とする。

## 2.3 活性度

活性度  $\alpha$  は、ネットワークのコンディションを表す指標であり、VNT 制御の性能指標として最大リンク利用率を用いて計算される。最大リンク利用率を  $u_{max}$  として、活性度  $\alpha$  を式 (3) のように定義する。これは、最大リンク利用率  $u_{max}$  が閾値  $\theta$  を超えると活性度  $\alpha$  が低下する関数である。 $\gamma$  と  $\delta$  はパラメータであり、 $\gamma$  は活性度の上限を、 $\delta$  は  $u_{max}$  が  $\theta$  近傍に位置する際の活性度  $\alpha$  の傾斜を決定する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{max} - \theta))} \quad (3)$$

## 2.4 制御行列の構造

制御行列は複数の VNT 候補をアトラクターとして記憶している。仮に  $m$  個の仮想網をアトラクターとして設定し、その内のある VNT 候補が  $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$  ( $1 \leq k \leq m$ ) と表されるとすると、制御行列  $\mathbf{W}$  は、式 (4) で計算される。 $\mathbf{X}$  は各行に  $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$  を記憶し、 $\mathbf{X}^+$  は  $\mathbf{X}$  の疑似逆行列を表す。

$$\mathbf{W} = \mathbf{X}^+ \mathbf{X} \quad (4)$$

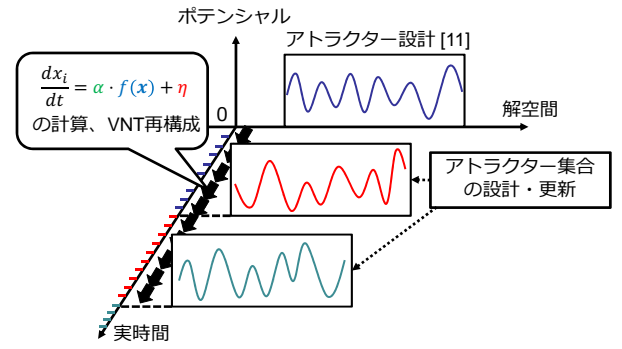


図 2 アトラクター選択とアトラクター更新の周期

## 3. アトラクター集合の更新手法

提案手法では、現在のトラヒック環境に適したアトラクター集合を求め、これにもとづいてアトラクター集合を更新することにより、アトラクター選択にもとづく VNT 制御において解発見までの時間を削減することを目的とする。

### 3.1 アトラクター設計手法の課題

従来では、アトラクター集合に組み入れるアトラクターとして、アトラクター設計手法 [11] にしたがって設計された多様なアトラクターを用いる。アトラクター設計手法の基本的な考え方は、トポロジー特性が良く、かつトポロジー特性が互いに異なる VNT 候補をアトラクターとすることである。具体的には、VNT 候補を Edge betweenness centrality が最大となるリンクに応じて VNT 候補群に分類し、各 VNT 候補群から Edge betweenness centrality が最も良好な VNT 候補を選び、アトラクターとしている。しかし、文献 [11] の手法は、トポロジー特性にもとづいてアトラクターを設計する手法であり、現在のトラヒック環境に応じてアトラクターを求めるものではない。すなわち、トポロジー特性は良好であるが、現在のトラヒックパターンに対して適応的ではない VNT 候補をアトラクターとする可能性があり、結果として VNT 制御の制御時間の増大をもたらしているものと考えられる。

### 3.2 アトラクター集合の更新へのアプローチ

3.1 章で述べた課題に対するアプローチとして、提案手法では現在のトラヒック環境に応じたアトラクター集合の更新を行う。現在のトラヒック需要情報を取得するためには多大な時間が必要であるが、アトラクター集合の更新では特に問題はない。これは図 2 に示すように、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では短周期で式 (2) を計算し、その値に応じて VNT の再構築を行うのに対し、アトラクター集合の設計および更新では周期を長くとることが可能なためである。

本稿で提案するアトラクター集合の更新手法では、オフライン計算によって各アトラクターの有効性を検証し、解発見までに要する制御回数が抑制されるアトラクター集合を求める。オフライン計算による検証では、全対地間トラヒック需要量 (以下、トラヒック需要マトリクス) を用いる。

### 3.3 アトラクター集合の更新アルゴリズム

アトラクター集合の更新手法の手順を説明する。本節で用い

る変数、および定数の表記と意味を以下に示す。

- $\phi_i$  ( $1 \leq i \leq N_{atr}$ ):  $i$  番目のアトラクター
- $\eta_s$  ( $1 \leq s \leq N_{noise}$ ): シード  $s$  をもつノイズ
- $c_i$ :  $\phi_i$  をアトラクターとし、 $s$  を変更して VNT 制御を  $N_{noise}$  回実行したときの制御目標の達成回数

•  $\mathbf{W}^{\{\phi_i\}}$ :  $\{\phi_i\}$  をアトラクターとしたとき、式 (4) を用いて計算される  $\mathbf{W}$

提案手法は 2 つの情報を用いる。1 つは現在の IP ネットワークのトラヒック需要マトリクス  $T_{cur}$ 、もう 1 つは文献 [11] のアルゴリズムにしたがって生成された  $N_{att}$  個のアトラクターである。本来、ゆらぎ制御はオンライン計算により動作するものであるが、提案手法では、取得したトラヒック需要マトリクスを用いてアトラクターの有効性をオフライン計算によって検証する。具体的には、取得したトラヒック需要マトリクスをもとにトラヒック需要を変化させ、各アトラクターを用いたゆらぎ制御を行い、制御成功率を算出し、有効性を検証する。オフライン計算中は、光パス  $l_i$  の設定状況を決定する状態変数  $x_i$  を、式 (2) ではなく式 (5) によって計算する。次に、制御回数  $C_{th}$  までの制御成功率をもとに用意したアトラクターをランク付けし、ランクが高いものから順に  $N_{set}$  個のアトラクターを選出する。最後に、選出したアトラクターで構成されるアトラクター集合をもとに制御行列を更新する。提案手法の具体的な動作手順は以下の通りである。

Step 1. 変数  $i \leftarrow 1$ ,  $c_1, c_2, \dots, c_{N_{atr}} \leftarrow 0$  と初期化し、Step 2. へ。

Step 2.  $\{\phi_i\}$  をアトラクターとし、式 (4) を用いて  $\mathbf{W}^{\{\phi_i\}}$  を計算し、Step 3. へ。

Step 3.  $s : 1, 2, \dots, N_{noise}$  について以下の処理を行い、Step 4. へ。

Step 3.1. 取得したトラヒック需要マトリクスと式 (5) にもとづいて VNT 制御を行い、Step 3.2. へ。

$$\frac{dx_k}{dt} = \alpha \cdot \left[ \varsigma \left( \sum_k W_{kl}^{\{\phi_i\}} x_l \right) - x_k \right] + \eta_s \quad (5)$$

Step 3.2. 制御開始からある制御回数  $C_{th}$  までに制御目標を達成すれば  $c_i \leftarrow c_i + 1$  とする。

Step 4.  $i = N_{att}$  であれば Step 5. へ、そうでなければ  $i \leftarrow i + 1$  とし、Step 2. へ。

Step 5.  $c_i$  が大きいものから順にアトラクター  $\phi_i$  を  $N_{set}$  個選出し、それらをアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  とする。Step 6. へ。

Step 6.  $\Phi_{rank}$  を用いて  $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$  を計算する。 $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$  を制御行列  $\mathbf{W}$  へ代入し、終了する。

## 4. 性能評価

本章ではトラヒック変動が発生した状況を想定し、以下の流れに沿って提案手法の有効性を評価する。まず現在のトラヒック環境に適応的なアトラクター集合をオフラインシミュレーションを利用して求め、そのアトラクター集合を用いてゆらぎ制御を行ったときの制御性能を評価する。次に現在のトラヒック環境からトラヒック変動が発生した場合を想定し、変動後の

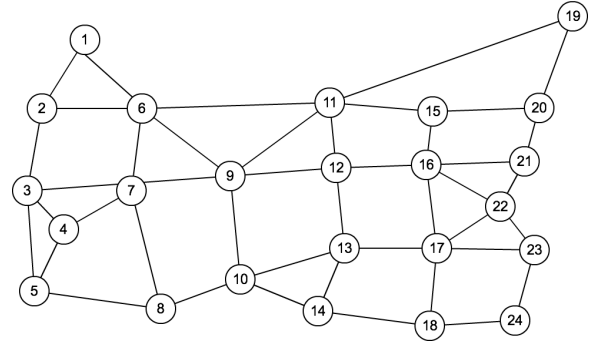


図 3 USNET

トラヒック環境において、前述で求めたアトラクター集合を用いたゆらぎ制御の制御性能を評価する。

### 4.1 評価環境

#### 物理トポロジー

対象とする物理ネットワークを図 3 に示す。USNET は 24 ノードから成るネットワークであり、各ノードは OXC と IP ルータで構成されているものとする。ノード間は OXC を端点として光ファイバで接続されている。IP ルータに設定するトランスミッター数、およびレシーバー数は一様に 10 とする。

#### アトラクター選択にもとづく VNT 制御

式 (2) のゆらぎ項  $\eta$  を平均 0、偏差 0.3 の正規乱数とし、シグモイド関数  $\varsigma(z) = \tanh(\frac{z}{2})$  における  $\mu$  は 20 とする。式 (3) の活性度のパラメーターを  $\gamma = 1$ ,  $\sigma = 50$ ,  $\theta = 0.5$  とする。また、初期仮想網はランダムに選択した対地間に光パスを設定した VNT とし、収束判定条件は最大リンク利用率  $u_{max}$  の値が 0.5 以下であり、かつ連続 10 回の VNT 制御において不変であることとする。

#### アトラクター集合の設計

式 (5) のゆらぎ項  $\eta_s$  を平均 0、偏差 0.3 の正規乱数とし、3.3 章における定数はそれぞれ  $N_{att} = 14$ ,  $N_{noise} = 1000$ ,  $N_{set} = 7$ ,  $C_{th} = 15$  とする。3.3 章のアルゴリズムを実行する前に用意しておくアトラクターは、文献 [11] の手法により 14 個取得する。ただし、文献 [11] の手法にしたがうと、USNET を用いて一度に得られるアトラクターは 7 個である。しかし、提案手法ではそれらのアトラクターとは異なるアトラクターを必要とするため、文献 [11] のアルゴリズムにおいて、クラスター間に設定する光パスの両端のノードをランダムに変更することによって、新たに 7 個のアトラクターを取得している。

#### 現在のトラヒック環境と環境変動

取得する現在のトラヒック需要マトリクス  $\mathbf{T}_{cur}$  は、式 (6) にしたがうものとする。ただし、 $\mathbf{LN}(\mu, \sigma^2)$  は平均  $\mu$ 、偏差  $\sigma$  の対数正規乱数を各成分に割り当てた行列である。

$$\mathbf{T}_{cur} \leftarrow \mathbf{LN}(3.5, (0.1)^2) \quad (6)$$

4.2.2 章の評価ではトラヒック変動を想定して VNT 制御を行う。現在のトラヒック需要マトリクス  $\mathbf{T}_{cur}$  に対し、式 (7) に従ってトラヒック変動が起こるものとする。ただし、 $\mathbf{T}(t)$  は時刻  $t$  におけるトラヒック需要マトリクス、 $\mathbf{N}(\mu, \sigma^2)$  は平均

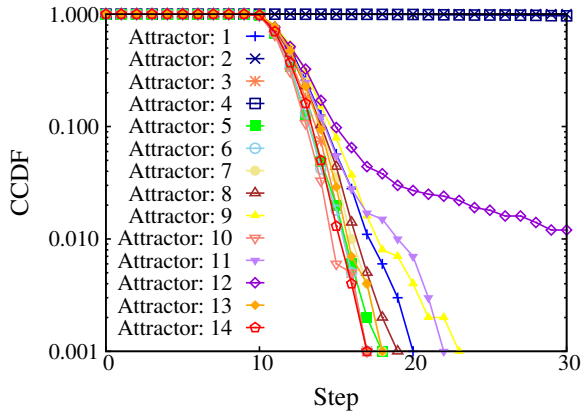


図4 各アトラクターを用いたゆらぎ制御の制御成功率

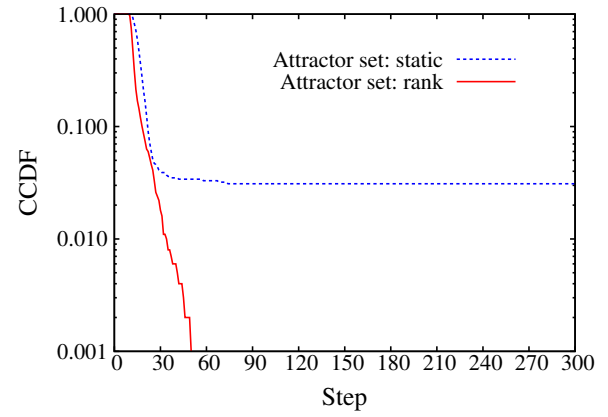


図5 各アトラクター集合を用いたゆらぎ制御の制御成功率

表1 15回のゆらぎ制御後の制御成功率

アトラクター	1	2	3	4	5	6	7
制御成功率 (%)	94.4	0.0	98.1	0.4	98.1	98.3	96.6
アトラクター	8	9	10	11	12	13	14
制御成功率 (%)	95.7	92.2	99.5	94.6	90.3	97.2	98.8

$\mu$ 、偏差  $\sigma$  に従う正規乱数を各成分に割り当てた行列である。 $\sigma$  は変動の大きさを表し、これを変更することによって提案手法がどれほどまでのトラヒック変動に耐えうるのかを評価することが可能である。また、評価で用いるトラヒック変動 1000 (=  $N_{noise}$ ) パターンは、 $\mathbf{N}(0, \sigma^2)$  の乱数シード 1000 種を用いて実現している。

$$\mathbf{T}(0) \leftarrow \mathbf{T}_{cur} + \mathbf{N}(0, \sigma^2) \quad (7)$$

### 制御目標

VNT 制御の制御目標は、最大リンク利用率  $u_{max}$  を 0.5 以下にすることとする。

### 比較対象のアトラクター集合

比較対象のアトラクター集合として、文献[11]の手法によって設計された多様なアトラクターで構成されるアトラクター集合  $\Phi_{static}$  を用意する。

## 4.2 評価結果

### 4.2.1 提案手法によるアトラクター集合の導出

まず、取得した現在のトラヒック需要マトリクス  $\mathbf{T}_{cur}$  を用いて、文献[11]の手法によって設計した 14 個のアトラクターの中から、提案手法にしたがってアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  に組み入れるアトラクターを求める。次に、 $\Phi_{rank}$  を用いてゆらぎ制御を行い、制御成功率の分布を調べる。

図4に、3.3章の手順に沿って得られた、各アトラクターを用いたゆらぎ制御の制御成功率の分布を示す。横軸はゆらぎ制御の制御回数を示し、小さい方が望ましい。また、縦軸は制御成功率を示し、制御成功率が高くなれば CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function: 相補累積分布関数) の値は小さくなる。図4を見ると、 $T_{cur}$  に対して適応的なアトラクターを用いたゆらぎ制御では制御回数 15 で 90% 以上の制御成功率を示しているが、適応的ではないアトラクターを用いたゆらぎ制御では制御回数 30 においても制御成功率が 10% 未満で

ある。定量的な議論のため、表1に15回のゆらぎ制御後の制御成功率を示す。表1を見ると、制御成功率が高いものは降順にアトラクター 10, 14, 6, 3, 5, 13, 7, 8, 11, 1, 9, 12, 4, 2 であることがわかる。したがって、提案手法のアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  を式(8)で定める。

$$\Phi_{rank} = \{\phi_{10}, \phi_{14}, \phi_6, \phi_3, \phi_5, \phi_{13}, \phi_7\} \quad (8)$$

次に、得られたアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  を用いてゆらぎ制御を行い、制御成功率の分布を調べる。比較対象として、アトラクター集合  $\Phi_{static}$  を式(9)で定める。これら2つのアトラクター集合をそれぞれ用いて、 $\mathbf{T}_{cur}$  のトラヒック環境下で実行したゆらぎ制御の制御成功率を図5に示す。図5を見ると、制御回数 50 に  $\Phi_{rank}$  を用いたゆらぎ制御の制御成功率が 100% に達している。一方で  $\Phi_{static}$  を用いたゆらぎ制御では、制御回数 74 から制御成功率 97% で不変である。したがって、提案手法のアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  は、従来手法の  $\Phi_{static}$  よりも現在のトラヒック環境に適応的であるといえる。

$$\Phi_{static} = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7\} \quad (9)$$

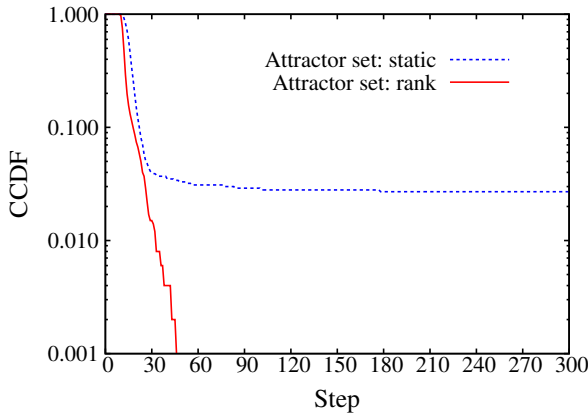
### 4.2.2 トラヒック変動後の VNT 制御の性能評価結果

トラヒック変動が発生する状況において、アトラクター集合の更新が VNT 制御の制御成功率、および制御回数に及ぼす影響を評価する。

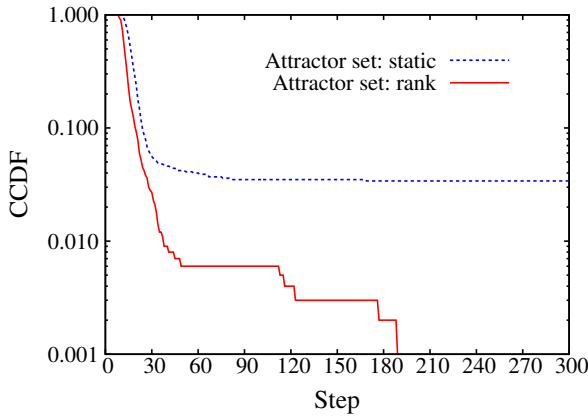
図6に、式(7)のトラヒック変動の大きさが  $\sigma = 0.1, 0.8, 1.6$  のときの VNT 制御の制御成功率を示す。図6の各図を見ると、トラヒック変動の大きさ  $\sigma$  を変えたとしても、提案手法によるアトラクター集合  $\Phi_{rank}$  を用いてゆらぎ制御を行ったときの制御成功率が、常に従来手法よりも高いことがわかる。したがって、提案手法は現在のトラヒック環境からある程度変動したとしても、VNT 制御の解を従来より素早く発見することが可能であるといえる。

## 5. まとめと今後の課題

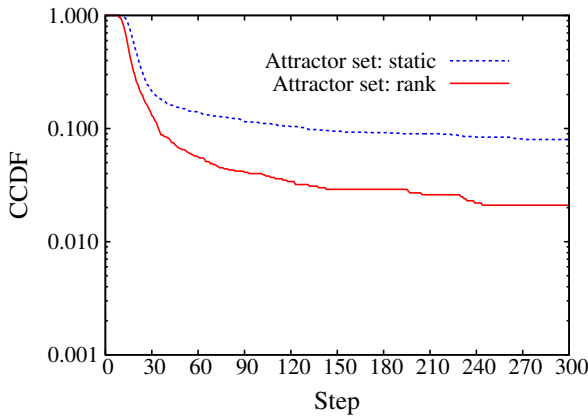
本稿では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御において、アトラクター集合の更新手法を提案した。提案手法では、文献[11]の手法によって設計したアトラクターと現在のトラヒック需要マトリクスを用いて、オフライン計算でゆらぎ制御を実



(a)  $\sigma = 0.1$



(b)  $\sigma = 0.8$



(c)  $\sigma = 1.6$

図6 トラフィック変動の大きさを変えたときのVNT制御の制御成功率

行した結果、制御成功率が高い順にアトラクターを選出することによってアトラクター集合を構築している。提案手法により求めたアトラクター集合を用いた、アトラクター選択にもとづくVNT制御では、従来手法と比較すると、VNT制御の制御回数をより削減することが可能となった。

本稿では、アトラクター集合として選出するアトラクターを、主にVNT制御の制御成功率の観点から選出したが、その選出したアトラクター間のトポロジー特性が酷似している可能性がある。したがって、アトラクター集合に含まれるアトラクター間のトポロジー特性の相違を考慮し、アトラクター集合を構成する手法を検討する。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A)15H01682によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] Cisco, Visual Network Index, “Forecast and Methodology, 2014-2019,” May 2015.
- [2] M. Kodialam and T. Lakshman, “Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 358–366, Apr. 2001.
- [3] Z. Zhang and A. Acampora, “A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, pp. 281–288, June 1995.
- [4] 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.
- [5] A. Soule, A. Nucci, R. L. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, “Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing changes,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, pp. 485–498, June 2007.
- [6] 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,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, pp. 177–189, Feb. 2010.
- [7] B. Ramamurthy and A. Ramakrishnan, “Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical WDM networks,” in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 1269–1275, Dec. 2000.
- [8] S. F. Gieselmann, N. K. Singhal, and B. Mukherjee, “Minimum-cost virtual-topology adaptation for optical WDM mesh networks,” in *Proceedings of IEEE ICC*, pp. 1787–1791, Sept. 2005.
- [9] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, “Adaptive virtual network topology control based on attractor selection,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.
- [10] S. Arakawa, H. Yamamoto, Y. Koizumi, S. Kamamura, K. Genda, and M. Murata, “Demonstration of adaptive VNT control using nationwide network infrastructure,” *IEICE Tech. Rep. (PN2015-7)*, vol. 115, pp. 33–38, June 2015.
- [11] T. Ohba, S. Arakawa, Y. Koizumi, and M. Murata, “Scalable design method of attractors in noise-induced virtual network topology control,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, pp. 851–863, Sept. 2015.