

WDM ネットワークにおける自己組織型仮想網制御の アトラクターの多様性の評価

大場斗士彦[†] 荒川 伸一[†] 小泉 佑揮[†] 村田 正幸[†]

[†] 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-ohba,arakawa,ykoizumi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、トラフィック変動への適応性を有する 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 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 制御手法を提案している。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、アトラクターとなる VNT 候補の決定手法が重要となる。しかし、VNT 候補数には制限があるため、多様性を考慮した VNT 候補を構築することが重要であり、そのためにはアトラクターの多様性を示す指標を導入することが必須である。本稿では、アトラクターの多様性を示す指標として、アトラクターとなる VNT 候補間のハミング距離を導入し、その有効性を評価する。また、ハミング距離を用いて、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の振る舞いを評価する。評価の結果、アトラクターとなる VNT 候補間のハミング距離が大きいと、VNT 候補が解空間上に広く分布し、アトラクターに多様性を持たせることができることがわかった。

キーワード 波長分割多重、波長ルーティング、仮想網制御、アトラクター選択

Evaluation of diversity of attractors for virtual network topology control based on attractor selection

Toshihiko OHBA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Yuki KOIZUMI[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka
565-0871 Japan

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

Abstract Our research group has proposed a VNT control method that is adaptive to traffic changes. The method is based on a dynamical system, called attractor selection, that models behavior where living organisms adapt to unknown changes in their surrounding environments and recover their conditions. One of important things of our VNT control method is how to determine attractors, i.e., VNT candidates. However, since the number of VNT candidates is limited, it is important to give diversity of attractors so that various kinds of VNTs are searched by attractor selection. Therefore, it is essential that we investigate measures of the diversity of attractors. In this paper, we introduce the hamming distance between VNT candidates as a measure of the diversity of attractors, and evaluate the behavior of VNT control based on attractor selection using the hamming distance. Evaluation results show that the hamming distance between VNT candidates represents the diversity of attractors because VNT candidates are widely distributed in state space when the hamming distance between VNT candidates is high.

Key words Wavelength Division Multiplexing, Wavelength Routed Network, VNT Control, Attractor Selection

1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) を用いたネットワークの通信形態として波長ルーティングを用いた光基盤ネットワークの構築が検討されている。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、波長のチャンネル (以降、光パス) をノード間に構築する。波長ルーティングを用いることで、光基盤ネットワークでは光信号を電気信号に変換することなくデータ転送が可能になり、ノード間での電気処理が不要となる。複数の光パスを用いて仮想的なトポロジーである仮想網 (VNT: Virtual Network Topology) を構築

し、その VNT 上に IP (Internet Protocol) トラフィックを収容する IP over WDM ネットワークが広く検討されている [1-4]。

我々の研究グループでは、トラフィック需要の変化に適応し、IP トラフィックを効率的に収容するための制御手法として、生物システムの未知の環境変動に適応する原理であるアトラクター選択にもとづく自己組織型 VNT 制御手法を提案している [5]。アトラクター選択の基礎となる概念は、ネットワークの制御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 つの振る舞いがネットワーク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。急激なトラフィック変動もしくは未知のトラフィック変動などの環境変動に対してはゆらぎを主体としてシステムを駆動することで、システムの状態を自律的に探索し環境変化に適応する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法により、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も適応的に動作すること [5]、およびより大きなトラフィック変動に対しても VNT の最大リンク利用率が低減されることを明らかにしてきた [6]。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、システムの状態はアトラクターに引きつけられるため、アトラクターとなる VNT 候補の決定手法が重要になる。しかし、文献 [5-7] のアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、どのような VNT 候補を構築すべきかが考慮されておらず、ランダムに算出した VNT 候補を使用している。本来、VNT 候補はホップ長などのトポロジーの性能指標や、トラフィック需要の変化に対する適応性を考慮して決定されるべきものであるため、文献 [8] では、トポロジーの性能指標の一つとして平均ホップ長を考慮した VNT 候補と、ランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定する手法を提案している。この手法では、トポロジーの性能指標を考慮しつつ、アトラクター選択により探索される解に多様性を持たせることで、VNT 制御性能を改善することが示されている。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、良好な解を発見したときに VNT 候補の置き換えを行う [9]。しかし、VNT 候補数には制限があるため、置き換えの際に多様性を考慮した VNT 候補を構築することが重要であり、そのためにはアトラクターの多様性を示す指標を導入することが必須である。

本稿では、アトラクターの多様性を示す指標として、アトラクターとなる VNT 候補間のハミング距離を導入し、その有効性を評価する。また、ハミング距離を用いて、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の振る舞いを評価する。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法と、アトラクターとなる VNT 候補の決定方法を述べる。3 章では、ハミング距離の定義を述べ、4 章では、評価で用いるシミュレーション環境とシミュレーション結果を述べ、アトラクターの多様性を示す指標としてのハミング距離の有効性について議論する。5 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. VNT 制御手法

2.1 制御対象とするネットワーク

本稿で想定する IP over WDM ネットワークを図 1 に示す。ネットワークは WDM で構成される光基盤ネットワーク (以降、WDM ネットワーク) と IP ネットワークの 2 つの層を持ち、WDM ネットワークは OXC と光ファイバからなる。IP ネットワークでは VNT 制御により、WDM ネットワークの OXC を経由する IP ルータ間に光パスが設定され、VNT が構築され

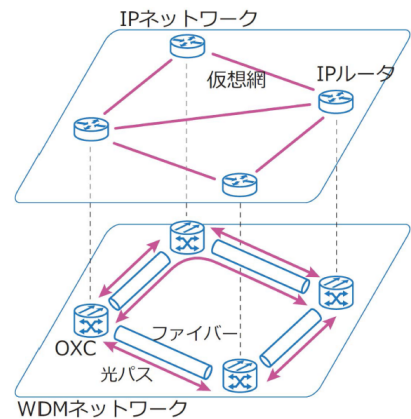


図 1 IP over WDM ネットワーク

る。IP ルータ間にはトラフィック需要があり、IP ルータに設置された d 個のトランスミッターとレシーバーと光パスを介してトラフィックが転送される。トラフィック需要は時々刻々と変化するため、 d 個のトランスミッターとレシーバーを用いてトラフィック需要に適した VNT を構築する必要がある。なお本稿では、IP ルータ間の経路は VNT をトポロジーとして最短経路制御にもとづいて転送されるものとしている。以降では、VNT のリンク利用率を単にリンク利用率と表記することとする。

トラフィック需要の変化に適応し、IP トラフィックを効率的に VNT 上に収容するためのアプローチとして、オフライン型の VNT 制御手法が検討されている [10]。光基盤ネットワークに管理ノードを設置し、管理ノードに制御情報を集めて最適な VNT を算出し再構成することで、VNT を制御する。しかし、インターネットが社会に普及するとともに、情報通信ネットワークの規模は拡大を続けている。その結果、管理ノードに集約すべき制御情報量が増大し、またその制御情報を用いて VNT を算出する時間も増大する。したがって、ネットワーク規模のスケラビリティの観点からは、従来の集中型の制御アプローチではなく、より少ない制御情報で自己組織的に VNT を制御する制御アプローチを適用していくことが重要である。以降で説明する VNT 制御手法では、文献 [5-8] と同様に通信需要の計測を必要とせず、VNT 上の通信品質のみを計測し、そのフィードバック値によって VNT を制御する。

2.2 アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法

本節では、文献 [5-8] で用いられているアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法を説明する。

2.2.1 動作概要

アトラクター選択によって駆動される生物システムは、生物が本来持つ動作であるアトラクターを持つ制御構造とゆらぎの 2 つの要素によって動作する。システムが円滑に動いている場合は、アトラクターを持つ制御構造がシステムの挙動を支配的に制御するため、システムの状態は強くアトラクターに引きつけられる。一方、環境変化によりシステムの動きが悪くなった場合は、ゆらぎがシステムの挙動を支配的に制御する。ゆらぎによってシステムの動きが良くなるシステムの状態を探索する [11]。アトラクター選択で駆動するシステムの振る舞いは、式 (1) で表される。

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

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ は、システムの状態である (n は状態変数の数)。この微分方程式により記述されるシステム

は、2つの挙動で構成される。1つは、関数 $f(\mathbf{x})$ で表されるアトラクターを持つ制御構造であり、もう1つは η で表されるゆらぎ、すなわちランダムな振る舞いである。これら2つの挙動は、システムのコンディションを示す活性度 α で調整される。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 α 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 η 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。反対に、コンディションが悪く α が小さい場合は、 η 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、アトラクター選択システムは、活性度に応じてアトラクターを持つ制御構造とゆらぎを適切に使い分けることで、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 α として、IP ネットワークの通信品質を用いる。すなわち、WDM ネットワークはアトラクターを持つ制御構造とゆらぎによって駆動され、IP ネットワーク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。これにより、生物におけるアトラクター選択と同様に、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法は IP ネットワークからのフィードバックを用い、IP ネットワークの状態が良くなるように制御を行う。

2.2.2 活性度

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 VNT 制御へフィードバックする活性度 α を決定する。 l_i の利用率 u_i は、 l_i を流れるトラヒック量を l_i のキャパシティで正規化した値とし、IP ネットワーク上の最大リンク利用率を $u_{max} = \max u_i$ とする。 u_{max} を用いて α を式 (2) のように定義する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{max} - \theta))} \quad (2)$$

γ は定数であり、 α の値域は $[0, \gamma]$ となる。 θ 、 δ も定数であり、 α は θ 付近で急激に 0 に近づき、そのときの傾きをパラメーター δ によって定める。

2.2.3 光パスの設定状況の制御

アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法において、状態変数 x_i のダイナミクスは式 (3) で表される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left(\varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right) + \eta \quad (3)$$

第一項の $\varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$ は、アトラクターを持つ制御構造であり、式 (1) の $f(\mathbf{x})$ に相当する。関数 $\varsigma(z)$ はシグモイド関数 $1/(1 + \exp(-\mu z))$ である (μ はパラメーター)。このアトラクターを持つ制御構造は、すべての状態変数との相互作用によって決まり、その相互作用は制御行列 W_{ij} で表される。第二項の η はゆらぎ項である。

光パス候補 i の設定状況を状態変数 $x_i (\in \mathbf{x})$ の値によって定める。 i 本目の光パスを l_i と表記し、状態変数 x_i の値により l_i の設定状況を決定する。ここでは、式 (4) のように閾値を 0.5 とし、 $x_i \geq 0.5$ のときは l_i を 1 とし、 $x_i < 0.5$ のときは 0 とする。ただし、 $x_i \geq 0.5$ のときは光パスが設定され、 $x_i < 0.5$

のときは光パスが設定されないことを表す。

$$l_i = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \geq 0.5 \\ 0 & \text{if } x_i < 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

2.2.4 アトラクター構造の構築

式 (3) の第一項が有するアトラクター構造は、制御行列 W_{ij} によって定まる。制御行列 W_{ij} は、複数の VNT 候補をアトラクターとする。構築する VNT を g_k とし、 g_k に対応する状態変数の組を $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ とし、 $\mathbf{x}^{(k)}$ をアトラクターがアトラクターとなるように制御行列を定義する。ここで、 m 個のアトラクターを記憶することを考える。 m 個のアトラクター $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ を各行とする行列を \mathbf{X} とすると、 $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ をアトラクターとする制御行列は式 (5) のように定義される。ここで、 \mathbf{X}^+ は \mathbf{X} の擬似逆行列である。

$$\mathbf{W} = \mathbf{X}^+ \mathbf{X} \quad (5)$$

2.2.5 アトラクターの更新

現在の環境に適した VNT を発見した場合は、それがアトラクターとなるように制御行列を更新する。VNT がアトラクターに収束していないが、活性度 α が高くなった場合は、そのときの VNT に対応する状態変数の組 \mathbf{x} がアトラクターとなるように制御行列 W_{ij} を更新する。アトラクター数には制限があるため、アトラクターの更新の際には、新たなアトラクターの追加に加えて、定義済みのアトラクターを削除する必要がある。ここでは、アトラクターの定義に用いた VNT g を FIFO アルゴリズムにより管理する。すなわち、最初のアトラクターの更新では 0 番目のアトラクターが削除され、2 回目のアトラクターの更新では 1 番目のアトラクターが削除され、というように定義済みのアトラクターが削除され、代わりに新たなアトラクターが追加される。

2.3 アトラクターとなる VNT 候補の決定手法

本節では、文献 [8] で用いられている VNT 候補の決定手法を説明する。

2.3.1 予備 VNT 候補の算出

まず、WDM ネットワークにおけるポート数制約、波長多重数制約を考慮した I-MLTDA [12] を適用することで予備 VNT 候補を複数個算出する。I-MLTDA は、

- H_{sd} : ノード s からノード d にパケットを送る際に利用する最小ホップ数

- Δ_{sd} : ノード s , ノード d 間のトラヒックデマンドの表記を用いて、以下のアルゴリズムにより VNT を算出する。
Step. 1 物理的に直接連結しているノード間に光パスを設定し Step. 2 へ。

Step. 2 H_{sd} を計算し、Step. 3 へ。

Step. 3 マルチホップのトラヒック量 $\Delta_{sd} \times (H_{sd} - 1)$ が最大となるノード対 sd を求める。 $\Delta_{sd} \times (H_{sd} - 1)$ の値が 0 であれば終了し、そうでなければ Step. 4 へ。

Step. 4 ノード s, d 間に光パスを設定する。ただし、光パスは始点ノード s および終端ノード d に残余ポートがあり、かつノード sd 間の経路上に使用可能な波長がある場合に限り設定する。設定できない場合は Δ_{sd} を 0 とする。Step. 2 へ。

2.3.2 VNT 候補の決定手法

次に、2.3.1 節で算出した複数個の予備 VNT 候補を、トポロジーの性能指標の 1 つである平均ホップ長の観点から絞り込む。さらに、ランダムに VNT 候補を算出し、予備 VNT 候

補を平均ホップ長の観点から絞り込んだものと合わせることで VNT 候補を決定する。また、ランダムな VNT 候補を算出する際は以下のアルゴリズムにより VNT を算出する。

Step. 1 物理的に直接連結しているノード間に光パスを設定し Step. 2 へ。

Step. 2 ノード間に光パスを設定するノード s, d をランダムに選択する。ただしノード s, d はこれまでに選択されていないノード対とする。選択されていないノード対がなければ終了し、そうでなければ Step. 3 へ。

Step. 3 ノード s, d 間に光パスを設定する。ただし、光パスは始点ノード s および終端ノード d に残余ポートがあり、かつノード sd 間の経路上に使用可能な波長がある場合に限り設定する。Step. 2 へ。

3. VNT 間のハミング距離

VNT g_k を構成する光パスの組を $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ (n は光パス数) とすると、2つの VNT $\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})$ と $\mathbf{x}^{(j)} = (x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(j)})$ 間のハミング距離は式 (6) のように定義される。ただし、光パスが設定されているとき $x_k^{(i)} = 1$ 、光パスが設定されていないとき $x_k^{(i)} = 0$ とする。

$$d(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \sum_{k=1}^n |x_k^{(i)} - x_k^{(j)}| \quad (6)$$

4. 評価

4.1 VNT 候補間のハミング距離とその多様性

本節では、VNT 候補間のハミング距離を評価することにより、ハミング距離がアトラクターの多様性を示す指標になり得るかを議論する。

4.1.1 VNT 候補の決定

2.3.1 節で述べたように、WDM ネットワークにおける制約を考慮した I-MLTDA を適用し、予備 VNT 候補を算出する。物理トポロジーは、日本の地理情報を考慮した 50 ノードのトポロジーを用い、ルーターにおけるトランスミッター数、およびレシーバー数はそのノードの度数に 2 を加えた値とし、ファイバ上で使用可能な波長数はすべてのファイバで等しく 4 個としている。また I-MLTDA を適用することで予備 VNT 候補を算出する際に与えるトラフィックデマンドマトリクスは、それぞれのノードに対応する都道府県別人口を用いたグラビティモデルにもとづく分布にしたがう乱数である。トラフィックデマンドマトリクスの各要素の具体的な値は、 $\Delta_{ij} = G \cdot P_i \cdot P_j$ で定義される。ここで、 Δ_{ij} はトラフィックデマンドマトリクスの (i, j) 成分、 P_i, P_j はノード i, j に対応する都道府県の人人口 [13]、 G は定数である。本稿では、I-MLTDA を適用して得た VNT の最大リンク利用率が 0.25 程度になる値を G として用いている。具体的な値は、 $G = 3.3 \times 10^{-14}$ である。以降、このようにして得られたトラフィックデマンドマトリクスを基準となるトラフィックデマンドマトリクスと呼ぶ。

I-MLTDA を適用することで予備 VNT 候補を算出する際は、トラフィック量が増大した場合を想定し、基準となるトラフィックデマンドマトリクスの各要素をランダムに 1.0~2.0 倍したものを使用する。このトラフィックパターンを 100 パターン使用して I-MLTDA を 100 回適用することで、予備 VNT 候補を 100 個算出する。アトラクター数 K は 30 とし、2.3.2 節で述べた方法で 30 個の VNT 候補を決定する。シミュレーションプログラムは C# 言語で作成した。

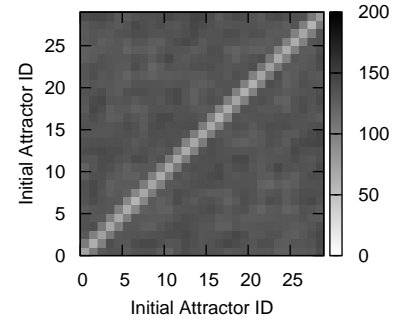


図 2 平均ホップ長を考慮した VNT 候補を 30 個とした場合の VNT 候補間のハミング距離

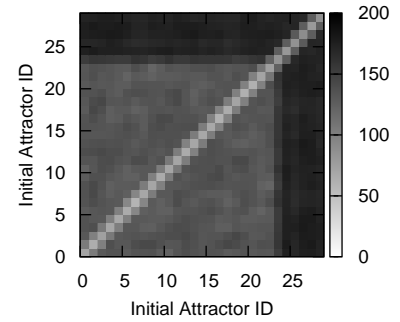


図 3 平均ホップ長を考慮した VNT 候補を 24 個、ランダムに算出した VNT 候補を 6 個とした場合の VNT 候補間のハミング距離

4.1.2 評価結果

VNT 候補間のハミング距離を図 2,3 に示す。図 2 は、平均ホップ長を考慮した VNT 候補を 30 個とした場合の VNT 候補間のハミング距離を、図 3 は平均ホップ長を考慮した VNT 候補を 24 個、ランダムに算出した VNT 候補を 6 個とした場合の VNT 候補間のハミング距離を示している。図 2,3 において、横軸と縦軸はともに VNT 候補の ID を示す。また、図 3 において、ID が 0~23 の VNT 候補は平均ホップ長を考慮した VNT 候補であり、ID が 24~29 の VNT 候補はランダムに算出した VNT 候補である。図 2 を見ると、平均ホップ長を考慮した VNT 候補間のハミング距離は 130~140 程度であることがわかる。また、図 3 を見ると、ランダムに算出した VNT 候補間のハミング距離、あるいは平均ホップ長を考慮した VNT 候補とランダムに算出した VNT 候補間のハミング距離は 160~190 程度であることがわかる。このことから、ランダムに算出した VNT 候補は、解空間上において他の VNT 候補とより離れた位置に広く分布していることがわかる。文献 [8] においては、トポロジーの性能指標として平均ホップ長を考慮した VNT 候補に、ランダムに算出した VNT 候補を加えて VNT 候補を決定することにより、仮想網制御性能が改善したことが示されている。仮想網制御性能の改善の要因としては、ランダムに算出した VNT 候補を加えることで、トラフィック変動に対する適応性が向上したことが考えられる。つまり、ランダムに算出した VNT 候補を加えることが、アトラクター選択により探索される解に多様性をもたらしることが考えられる。これと、本評価に

より得られた、ランダムに算出した VNT 候補は他の VNT 候補間のハミング距離が大きいことを合わせると、アトラクターの多様性を示す指標として、VNT 間のハミング距離を用いることは有効であるといえる。

4.2 VNT 制御の振る舞いの評価

本節では、ハミング距離を用いて、VNT 制御の振る舞いを評価する。

4.2.1 評価環境

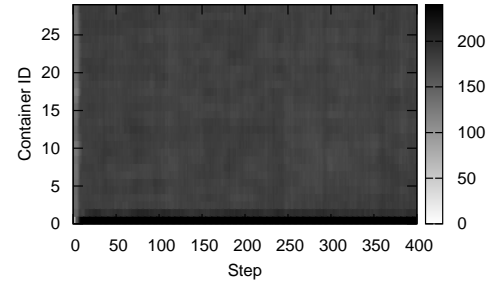
4.1.1 節で述べたのと同様に VNT 候補を決定し、VNT 候補を初期アトラクターとして与え、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の振る舞いを評価する。ただし、30 個の VNT 候補はすべて平均ホップ長を考慮したものを使用する。物理トポロジーは、4.1.1 節と同一のトポロジーを用い、ルーターにおけるトランスミッター数、およびレシーバー数も 4.1.1 節と同様である。また、式 (2) の活性度の定数を $\gamma=1$ 、 $\delta=50$ 、 $\theta=0.5$ とし、式 (3) の η を平均 0、偏差 0.15 の正規分布にしたがう乱数とし、シグモイド関数のパラメーター μ は 20 としている。与えるトラフィックパターンは、トラフィック量が増大した場合を想定したトラフィックパターン（基準となるトラフィックデマンドマトリックスの各要素をランダムに 1.8~2.0 倍したもの）を使用する。

また、仮想網制御の制御目標は、最大リンク利用率を 0.5 以下とすることである。最大リンク利用率は、VNT を構成する全ての光パスのリンク利用率のうち最大となるリンク利用率とする。最大リンク利用率が高くなると、ユーザーの通信品質が劣化する。そのため、VNT 制御により最大リンク利用率をより低く抑えることが制御目標となる。ただし、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、最大リンク利用率の最小化を図るのではなく、最大リンク利用率を一定値以下とすることを目標としている。

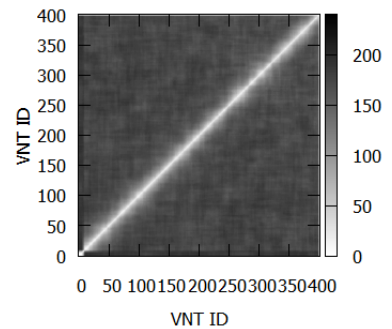
VNT 制御は、平均ホップ長が最小となる VNT 候補を初期状態として開始し、VNT の設定状態が収束するまで最大 400 回 VNT の再構築を行う。VNT の設定状態が収束するとは、制御目標を達成し、活性度が 0.5 以上である状態を、VNT を 10 回再構築しても保っていることを指す。また、VNT の再構築を 400 回行っても VNT の設定状態が収束しなかった場合は、VNT 制御に失敗したとして制御を打ち切る。

4.2.2 評価結果

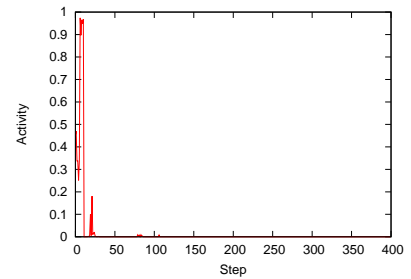
まず、VNT 制御に失敗した場合の振る舞いの評価結果を図 4 に示す。図 4 において、上図 (a) は VNT 制御の各ステップで再構築された VNT とアトラクター間のハミング距離の推移を示しており、横軸は制御ステップ、縦軸はアトラクターとなる VNT 候補が格納されている配列のインデックスを表す。アトラクターは 2.2.5 節で述べたように更新される。中図 (b) は VNT 制御の各ステップで再構築された VNT 間のハミング距離、すなわち解空間上の探索範囲の推移を示しており、横軸、縦軸はともに制御ステップを表す。下図 (c) は活性度の推移を示しており、横軸は制御ステップ、縦軸は活性度を示す。図 4 を見ると、上図 (a)、中図 (b) からは、各ステップで再構築された VNT とアトラクター間のハミング距離、各ステップで再構築された VNT 間のハミング距離がともに大きく、また下図 (c) からは活性度がかなり小さい状態で推移していることがわかる。このことから、制御目標を達成できず、活性度が小さくなるために、アトラクターを持つ制御構造に比べてゆらぎの影響が大きくなり、解空間上ではどのアトラクターとも離れた範囲を広く探索していること、また、探索範囲は広いものの、400



(a) 構築される VNT とアトラクター間のハミング距離



(b) 構築される VNT 間のハミング距離

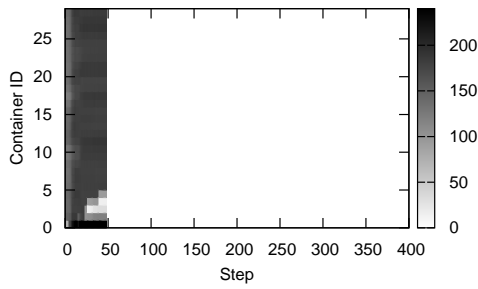


(c) 活性度

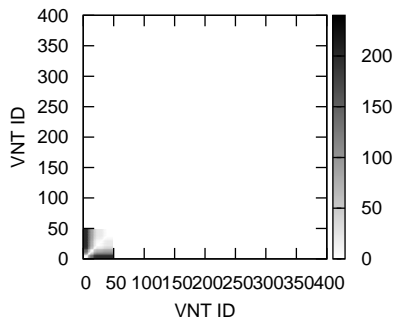
図 4 VNT 制御失敗時の VNT 制御の振る舞い

ステップ以内に制御目標を達成する適したアトラクターを発見できずに制御に失敗していることがわかる。

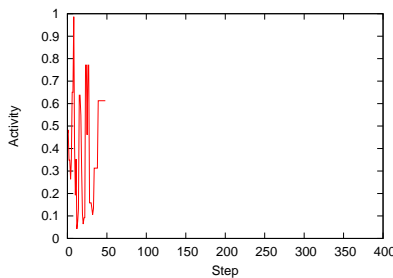
次に、VNT 制御に成功した場合の振る舞いの評価結果を図 5 に示す。図 5 において、各図 (a)(b)(c) が示すものとその見方は図 4 と同様である。図 5 を見ると、上図 (a) からは、40~50 ステップ目で再構築された VNT と 3 番目のアトラクター間のハミング距離が小さくなっていることがわかる。また、中図 (b) からは、40 ステップ目以降で再構築された VNT 間のハミング距離がかなり小さくなっていることがわかる。そして、下図 (c) からは、40 ステップ目付近までは活性度が安定しないが、それ以降は 0.5 以上で安定していることがわかる。このことから、制御目標を達成できず、活性度が小さいときは、アトラクターを持つ制御構造に比べ、ゆらぎの影響が大きいため、解空間上ではどのアトラクターとも離れた範囲を広く探索するが、制御目標を達成する適したアトラクターを発見し、活性度



(a) 構築される VNT とアトラクター間のハミング距離



(b) 構築される VNT 間のハミング距離



(c) 活性度

図 5 VNT 制御成功時の VNT 制御の振る舞い

が大きくなるとアトラクターを持つ制御構造の影響が大きくなり、そのアトラクター付近を探索することがわかる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、自己組織型 VNT 制御手法であるアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法において、アトラクターの多様性を示す指標として、ハミング距離を用いることが有効であることを示した。VNT 間のハミング距離を評価することにより、VNT 間のハミング距離が大きいほど、VNT が解空間上に広く分布し、アトラクターに多様性がもたらされることがわかった。また、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の振る舞いをハミング距離を用いて評価することにより、VNT 制御手法

が解を探索する振る舞いを調査した。

本稿では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の振る舞いをハミング距離を用いて評価したが、今後は個々のアトラクターがどのように作用して VNT 制御の振る舞いに影響を与えているかを評価する予定である。

謝辞

本研究の一部は NICT 委託研究「脳や主体の動作原理に基づく光通信ネットワーク制御基盤に関する研究開発」によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 83, no. 10, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [2] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 72–84, May 2000.
- [3] A. Soule, A. Nucci, R. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, "Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing changes," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 485–498, Jun. 2007.
- [4] 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.
- [5] 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, no. 11, pp. 1720–1731, Jun. 2010.
- [6] Y. Minami, S. Arakawa, Y. Koizumi, T. Miyamura, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control in WDM-based optical networks," in *Proceedings of INTERNET*, Sep. 2010, pp. 49–54.
- [7] K. Mizumoto, S. Arakawa, Y. Koizumi, D. Shimazaki, T. Miyamura, S. Kamamura, K. Shiimoto, A. Hiramatsu, and M. Murata, "A distributed control of virtual network topologies by using attractor selection model," *International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012)*, Oct. 2012.
- [8] 大場 斗士彦, 荒川 伸一, 小泉 佑揮, 村田 正幸, "WDM ネットワークにおける自己組織型仮想制御のアトラクター決定手法の提案と評価," *電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会*, Mar. 2013.
- [9] 小泉 佑揮, 荒川 伸一, 鎌村 星平, 島崎 大作, 宮村 崇, 平松 淳, 村田 正幸, "アトラクター選択にもとづく仮想制御の複数ノード障害に対する適応性," *電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会*, Mar. 2013.
- [10] G. Agrawal and D. Medhi, "Lightpath topology configuration for wavelength-routed IP/MPLS networks for time-dependent traffic," in *Proceedings of GLOBECOM*, Nov. 2006, pp. 1–5.
- [11] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, no. 1, p. e3, Jan. 2008.
- [12] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 8, no. 5, pp. 598–607, Oct. 2000.
- [13] 総務省統計局, "統計局ホームページ/人口推計/人口推計 (平成 23 年 10 月 1 日現在)," <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/2011np/index.htm>.