

計算量を削減した自己組織型仮想網制御手法の評価

水元 宏治[†] 荒川 伸一[†] 小泉 佑揮[†] 島崎 大作^{††} 宮村 崇^{††}
鎌村 星平^{††} 塩本 公平^{††} 平松 淳^{††} 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

^{††} 日本電信電話株式会社 ネットワークサービスシステム研究所

E-mail: [†]{k-mizumoto,arakawa,ykoizumi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

^{††}{shimazaki,daisaku,miyamura.takashi,kamamura.shohei,shiomoto.kohei,hiramatsu.atsushi}@lab.ntt.co.jp

あらまし 波長分割多重 (WDM) を用いた WDM ネットワークにおいて、波長レベルでの信号処理を行い仮想網 (VNT) を構築し、その上に IP 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。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を用いた VNT 制御手法を提案している。しかし、従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、制御対象となるネットワーク規模の増大とともに VNT 算出までの時間が増大する。そこで、大規模ネットワークにアトラクター選択を用いた VNT 制御を適用するために、計算量を削減した VNT 制御手法を提案している。本稿では、計算量を削減した VNT 制御手法のトラフィック変動への適応性を評価する。計算機シミュレーションによる評価の結果、提案手法は、従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法と同程度の割合で制御目標を達成することがわかった。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

A Distributed Control of Virtual Network Topologies by Using Attractor Selection Model

Koji MIZUMOTO[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Yuki KOIZUMI[†], Daisaku SHIMAZAKI^{††}, Takashi MIYAMURA^{††}, Shohei KAMAMURA^{††}, Kohei SHIOMOTO^{††}, Atsushi HIRAMATSU^{††}, and Masayuki MURATA[†]

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

^{††} NTT Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation, Japan

E-mail: [†]{k-mizumoto,arakawa,ykoizumi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

^{††}{shimazaki,daisaku,miyamura.takashi,kamamura.shohei,shiomoto.kohei,hiramatsu.atsushi}@lab.ntt.co.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. However, since our previously proposed VNT control method relies on the centralized calculation of system variables, the computational overhead drastically increases as the size of network increases. Then we have proposed a distributed calculation method to construct a virtual network topology in IP-over-WDM networks. Our method is again based on the attractor selection model, but the adaptability has not been shown yet. In this paper, we show our proposed method is adaptive to traffic changes. Evaluation results show that success rate of our method is almost same as one of our previously proposed VNT control method.

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内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 VNT 上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を用いた自己組織型 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。アトラクター選択を VNT 制御手法に適用することで、集中型の VNT 制御手法において必要であったトラフィック需要の計測を不要とし、各ノードで直接取得可能な VNT のリンク利用率のみを用いて VNT を制御しつつ、環境変化に対してより早く対応する自己組織型 VNT 制御を実現している。アトラクター選択を用いた 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]。しかし、文献 [5,6] におけるアトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、制御システムの状態変数の更新に $O(N^4)$ (N は WDM ネットワークのノード数) の計算時間を要する。文献 [5,6] で対象としている 50 ノード規模では 0.01 秒程度の計算時間であるものの、1000 ノード規模では概算で 1000 秒程度の計算時間を必要とする。そこで、我々の研究グループでは、適応性の高いアトラクター選択を用いた VNT 制御手法を大規模なネットワークに適用するために、計算量を削減した VNT 制御手法を提案している [7]。提案手法は、トラフィック変動への適応性を有するアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の計算量を削減し、より短い制御間隔で仮想網を算出することを可能とする。より短い制御間隔で仮想網を算出することが可能となれば、より規模の大きいネットワークに対して制御手法が適用できる。文献 [7] では、提案手法の仮想網算出に $O(N^2)$ の計算時間が必要で、1000 ノード規模では計算時間は約 0.032 秒で従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の約 1000 秒と比較して、1/30000 程度に計

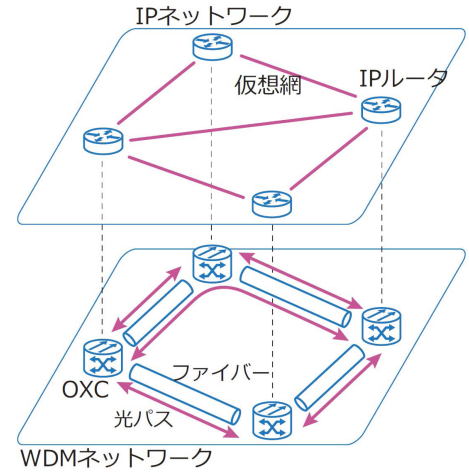


図1 IP over WDM ネットワーク

算時間を削減することを示した。しかし、文献 [7] では、提案手法のトラフィック変動に対する適応性評価として、ランダムに与えたトラフィック需要を用いている。実ネットワーク上に流れるトラフィック需要を考慮すると、ランダムに与えたトラフィック需要に対する評価だけでは限定的である。そこで、本稿では、さまざまなトラフィック需要を与えることで、計算量を削減した提案手法の性能を評価する。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では、対象とするネットワークについて述べる。3章では、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法を述べ、4章で性能評価を行う。最後に、5章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 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 と光ファイバーからなる。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作られ、VNT が構築される。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。また、光ファイバ上で利用可能な波長数は十分にあるものとし、VNT を構成する光パスの数はトランスミッターとレシーバー数の制約によってのみ定まるとしている。

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 [8]。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 を算出し再構築することで、VNT を制御する。しかし、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。従って、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。以降で説明する提案制御手法は、文献 [5,6] 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。

3. 自己組織型 VNT 制御手法

3.1 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 [9]。アトラクター選択で駆動するシステムの振る舞いは、以下の式で表される。

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

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 $f(x)$ 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、 $f(x)$ 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、 $f(x)$ が支配的にシステムを制御する。そのため、 \mathbf{x} は $f(x)$ 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、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。

3.2 VNT 制御手法

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、システム状態 \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も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、アトラクター選択を用いた 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。

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、光パス候補 l_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。状態変数 x_i のダイナミクスは、以下の式で表される。

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

第一項の $\zeta \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$ は、アトラクターを持つ制御構造であり、式 (1) の $f(x)$ に相当する。関数 $\zeta(z)$ 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、すべての光パスの設定状態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 l_i を設定するか否かは、状態変数 x_i の値によって判断する。式 (2) の関数 $\eta(z)$ の形状より、 x_i は厳密には、0、1 に収束せず $x_i \approx 0, 1$ となる。そこで、閾値を 0.5 とし、 $x_i \geq 0.5$ のときは光パスを設定し、 $x_i < 0.5$ のときは光パスを設定しない。 α が小さく、ゆらぎが優先的に動作を決定しているときには、物理ネットワーク上の資源に関する制約を満たさない場合がある。その場合は、光パスの ID の昇順に光パスを設定するものとする。

提案手法では、複数のノードを用いて VNT 制御を行う。ネットワークを構成するノードそれぞれに、光パス候補の設定状態を制御する部分を設置する。この光パス候補の設定状態を制御する部分を以降管理ノードと呼ぶ。各管理ノードは、管理する光パス候補が割り当てられる。その割り当て方は、自ノードを起点とする光パス候補を割り当てる。図 2 に、ノード数 4 のネットワークにおける光パス候補の割り当て方を示す。ノード A、B、C、D には、それぞれ管理ノードが設置されており、自ノードを起点とする光パス候補を管理する。各管理ノードは、アトラクター選択を用いて光パス候補の設定状態を制御する。すなわち、管理する光パス候補 i に対して式 (2) を用いて、その設定状態を決定する。図 3 に、各管理ノードが算出した光パス集合を示す。各管理ノードが算出した光パス集合が重なりあって、図 4 に示すように VNT が構築される。このように、提案手法では複数の管理ノードを用いて VNT を算出することで従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法に比べて計算量を削減している。

3.3 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 を流れるトラフィック量を 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 $u_{max} = \max_i u_i$ とする。 u_{max} を用いて α を以下の通りに定義する。

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

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。

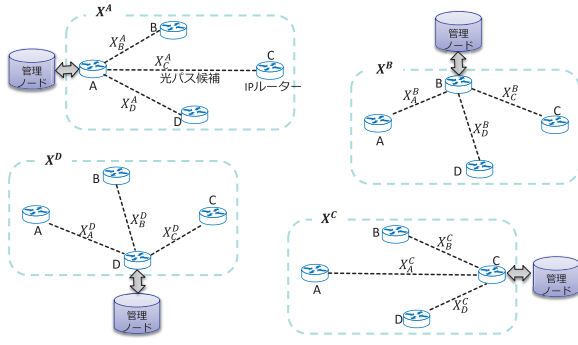


図2 各ノードが管理する光パス候補

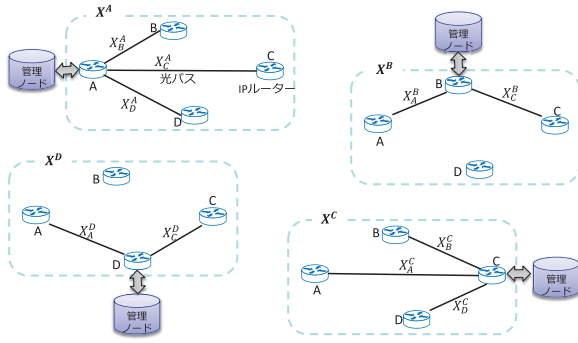


図3 各ノードが算出する光パス

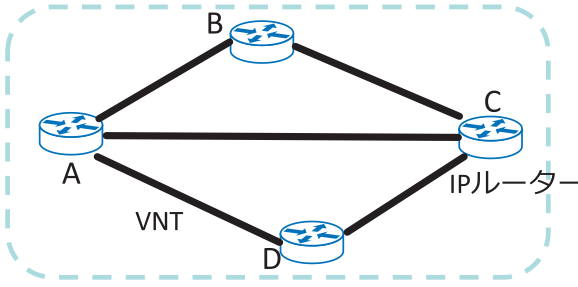


図4 構築される VNT

3.4 Hebb 則にもとづくアトラクター構造の構築

式 (2) 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。本節では、複数の VNT 候補をアトラクターとする制御行列 W_{ij} の決定方法を述べる。

複数のアトラクターを有する制御行列 W_{ij} を、ホップフィールドネットワークにおける Hebb の学習則によって定める。すなわち、 K 個の VNT 候補をアトラクターとして定義する場合を考え、その 1 候補を $\mathbf{x}^s = (x_1^s, \dots, x_i^s, \dots, x_n^s)$ ($1 \leq s \leq K$) と表す時、制御行列 W_{ij} を以下のように定義する。

$$W_{ij} = \begin{cases} \sum_{s=1}^K (2x_i^s - 1)(2x_j^s - 1) & \text{if } i \neq j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

x_i は、収束値として定義した s 番目のアトラクターの i 番目の光パスの設定状態を表す。 K は VNT の候補数である。候補となるアトラクターを定める際には、光パスを設定する時 1、光パスを設定しない時 0 として定める。

3.5 アトラクター構造の動的再構成

式 (4) によって制御行列を定義した場合、式 (2) を用いて算出される VNT は、アトラクターとして定義した VNT のいずれかである。そこで、トラフィック変動に対する適応性および高速なアトラクターへの収束を実現するために、動的に W_{ij} を更新し、現在の環境に適した VNT をアトラクターとして定義する。具体的には、制御中に最大リンク利用率が目標値 θ より大きい状態から θ 以下となった場合に、その VNT をアトラクターとし、式 (4) により W_{ij} を再計算する。

ただし、ホップフィールドネットワークの知見から、アトラクター構造中に定義できるアトラクター数は光パス候補数の 15% 程度であることがわかっている [10]。このように、アトラクター構造が定義可能なアトラクター数には制限があるため、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、定義済みのアトラクターの中で最も古い VNT を削除し、新たな VNT を追加する。この操作により更新したアトラクターの集合に対して式 (4) を用いて制御行列 W_{ij} を再計算する。

4. 性能評価

4.1 評価環境

各制御手法の性能を計算機シミュレーションにより評価する。物理トポロジーはランダムに生成した 100 ノード、200 光ファイバーのネットワークを用いる。、ルーターにおけるトランスミッタ数およびレシーバーの数はすべてのルーターで等しく 16 個としている。光パスを設定可能なすべてのノードペア間、すなわち、光パス候補 l_i に対して式 (2) の状態変数 x_i を 1 つだけ定義する。本評価では、光パス候補 l_i に対して状態変数を 1 つだけ割り当てるが、状態変数を 2 つ以上割り当てることで、ノード間に 2 本以上の光パスを設定することも可能である。また、式 (3) の活性度の定数を、 $\gamma = 1$ 、 $\delta = 50$ 、 $\theta = 0.5$ とする。式 (2) の η を平均 0、分散 0.15 の正規分布に従う乱数とし、シグモイド関数のパラメーター μ は 1 としている。また、アトラクター数 K は 5 とし、シミュレーション開始時にランダムに生成した VNT 候補をアトラクターとして定義し W_{ij} を計算する。

4.2 評価指標

本評価では、制御成功率と制御回数を評価指標とする。アトラクター選択を用いた 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。本稿では、最大リンク利用率を $\theta (= 0.5)$ 以下とすることを目標としている。制御手法が、連続して 10 回最大リンク利用率を目標値以下に制御できた場合を制御成功と定義する。さまざまなトラフィックを与え、制御に成功した割合を制御成功率とする。制御回数は、制御に成功した場合に要した制御回数とする。制御成功率と制御回数を評価することで、制御手法のトラフィック変動に対する適応性を評価する。

4.3 比較手法

オフライン型の VNT 制御手法である MLDA、I-MLTDA [11]、

従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法、および、提案する VNT 制御手法の 4 方式を比較する。以下の表記を用いて比較手法を説明する。

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波長数

Δ_{sd} : ノード s からノード d へのトラヒック需要

4.3.1 MLDA

MLDA は、以下のアルゴリズムにより VNT を算出する。トラヒック需要の多いノード間から降順に光パスを設定することで VNT を算出する。

Step. 1: 物理ファイバーが敷設されているノード間に光パスを設定し Step. 2 へ。

Step. 2: Δ_{sd} が最も大きくなる ij を求める。 Δ_{sd} が 0 であれば終了し、そうでなければ Step. 3 へ。

Step. 3: ij 間に光パスを設定する。光パスは始点ノードおよび終端ノードに残余ポートがある場合にのみ設定する。設定できなければ、 Δ_{ij} を 0 とし、Step. 2 へ。

4.3.2 I-MLTDA

I-MLTDA は、以下のアルゴリズムにより VNT を算出する。

Step. 1: 物理ファイバーが敷設され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: $\Delta_{sd} \cdot (H_{sd} - 1)$ が最も大きくなる ij を求める。 $\Delta_{ij} \cdot (H_{ij} - 1)$ が 0 であれば終了し、そうでなければ Step. 4 へ。

Step. 4: ij 間に光パスを設定する。光パスは始点ノードおよび終端ノードに残余ポートがある場合にのみ設定する。設定できなければ、 Δ_{ij} を 0 とし、Step. 2 へ。

4.4 評価結果

トラヒック需要が平均 1、分散 σ^2 の対数正規分布に従う場合の制御成功率を図 5 に示す。制御回数の最大値を 1000 とし、1000 回以内に制御に成功した割合を異なる分散値に対して示している。図 5 において、横軸は分散 σ^2 であり、縦軸は、制御成功率である。図中の“Attractor Selection (distributed)”は提案手法の結果を、“Attractor Selection (centralized)”は従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の結果を、“I-MLTDA”は I-MLTDA の結果を、“MLDA”は MLDA の結果をそれぞれ示している。ただし、I-MLTDA、MLDA では、トラヒック需要の情報を取得可能と仮定している。それぞれの分散値に対し、100 種のトラヒック需要を生成し、各制御手法を適用し、その際の制御成功率を求めた。ただし、生成したトラヒック需要のパターンのうち、ノード間のトラヒック需要が 50 を超えるパターンは除外している。これは、ノード間のトラヒック需要が 50 を超えると、制御目標の達成が不能になるからである。制御

の目標は最大リンク利用率を $\theta (= 0.5)$ 以下とすることである。リンクのキャパシティ $C (= 100)$ に対してノード間に 50 以上のトラヒック需要が生じると、そのノード間にリンクを直接張っても目標に達することはない。なお、本評価ではノード間に 2 本以上の光パスを設定することは、考慮していない。

図 5 を見ると、 σ^2 が 1 以下の場合、どの制御手法も制御成功率は、ほぼ 100% となっている。しかし、 σ^2 が 1 を超えると、提案手法の制御成功率、従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の制御成功率は下がり始めている。 σ^2 が大きくなると、ノード間に大きなトラヒック需要が出現する確率が大きくなり、一般に制御は困難になる。提案手法の制御成功率は、 σ^2 が 1 より大きい場合、集中型の制御手法 I-MLTDA、MLDA の制御成功率と比較すると小さくなっている。ただし、本評価ではトラヒック需要の情報を取得可能と仮定したが、実際には、トラヒック需要の情報を取得することは困難であるという指摘もされている。現在は、トラヒック需要を推定して VNT を算出しており、推定誤差により制御成功率は劣化すると考えられる。 σ^2 が 1.4 の場合に注目すると、提案手法の制御成功率は、70% まで低下している。制御成功率の改善のためには、埋め込むアトラクターと、その更新ポリシーの検討が重要であり、今後の課題である。

平均 1、分散 σ^2 が 1 の対数正規分布に従うトラヒック需要 T とそのトラヒック需要を β 倍したトラヒック需要 $T \times \beta$ を与えた場合の制御成功率を図 6 に示す。図 6 において、横軸は、 β であり、縦軸は、制御成功率である。図 6 を見ると、 β の値が大きくなると、いずれの制御手法もその制御成功率が下がっている。これは、 β の値が大きくなりトラヒック需要量が増加したためであると考えられる。提案手法の制御成功率は、 β が 1.3 の場合約 91%、 β が 1.5 の場合約 75% となっている。また、制御回数に注目すると、提案手法が制御成功に必要な制御回数は、 β が 1.3 の場合で平均約 46 回、 β が 1.5 の場合で平均約 33 回であった。これは、実ネットワークでの適用を考えた場合、1 分に 1 回リンク利用率を取得し制御を 1 回行った際、40 分以下でトラヒック変動に適用する。なお、制御成功の定義が、連続して 10 回最大リンク利用率が目標値以下となることなので、制御回数が 10 回以下となることはない。

5. まとめと今後の課題

本稿では、自己組織型の VNT 制御手法のトラヒック変動に対する適応性を評価した。提案手法は、従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法とほぼ同等の割合で制御目標を達成することが明らかとなった。提案手法の制御成功率は、集中型の制御手法 I-MLTDA、MLDA の制御成功率と比較して小さい場合があった。制御成功率の改善のためには、埋め込むアトラクターと、その更新ポリシーの検討が重要であり、今後の課題である。

本稿では、従来のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法との比較評価という観点から、従来手法が適用可能な 50 ノード規模の物理トポロジーを対象としてシミュレーションを行った。ノード規模 50 以上の物理トポロジーにおける適応性は明

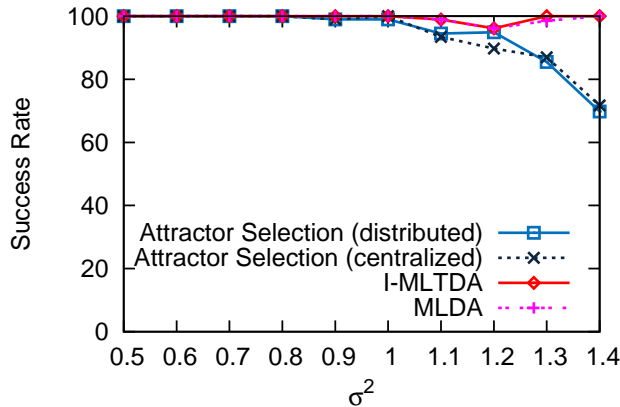


図5 制御成功率

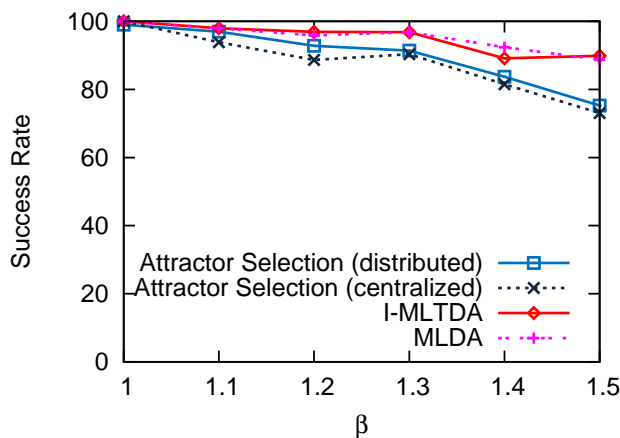


図6 トラフィック量に対する制御成功率

らかとなっていない。今後は、1000 ノード規模の物理トポロジを対象としてトラフィック変動に対する適応性を評価する。

謝 辞

本研究開発成果の一部は、平成 23 年度総務省委託研究情報通信技術の研究開発「脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発（脳の動作原理の活用による省エネで外乱に強いネットワーク制御基盤技術）」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. E83-B, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [2] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [3] 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. 13, pp. 485–498, June 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, pp. 1720–1731, June 2010.
- [6] Y. Minami, Y. Koizumi, S. Arakawa, T. Miyamura, K. Shiimoto, and M. Murata, "Benefits of virtual network topology control based on attractor selection in WDM networks," *International Journal on Advances in Internet Technology*, vol. 4, pp. 79–88, Sept. 2011.
- [7] 水元宏治, 荒川伸一, 小泉佑揮, 島崎大作, 宮村崇, 鎌村星平, 塩本公平, 平松淳, 村田正幸, "計算量を削減した自己組織型仮想網制御手法の提案と評価," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2011-182), pp. 17–22, Mar. 2012.
- [8] G. Agrawal and D. Medhi, "Lightpath topology configuration for wavelength-routed IP/MPLS networks for time-dependent traffic," in *Proceedings of GLOBECOM*, pp. 1–5, Nov. 2006.
- [9] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [10] Y. Baram, "Orthogonal patterns in binary neural networks," tech. rep., NASA, Mar. 1988.
- [11] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength-routed optical networks: linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a re-configuration study," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 269–276, Apr. 1997.