

進化適応性を備えた WDM ネットワーク設備増強手法の提案と評価

井上 昂輝[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

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

あらまし 通信量の増大によって WDM ネットワークの物理資源量が不足する場合には物理設備を増強する必要がある。しかし、物理ネットワークと VNT 制御は密接に関係しており、VNT 制御の適応性を損なわないネットワーク設備増強が必要である。本稿では、トラフィック需要増大に伴う物理設備量の増強を環境変動の 1 つとして捉え、様々な環境変動に対する進化適応性を備えた物理トポロジーを構築するためのネットワーク設備増強手法を提案し、その有効性を示す。提案手法は、可塑性を備えた物理トポロジーを設計する。これにより、将来のトラフィック変動に対して設定可能な VNT の多様性が増し、VNT 制御による環境変動への適応性の更なる向上が期待される。計算機シミュレーションによる評価では、発見的手法にもとづく VNT 設計手法である I-MLTDA を用いて現在のトラフィック需要に最適な位置にポート追加を行う手法と比較した。12 ノード規模のネットワークを対象に計算機シミュレーションを行った結果、提案手法は比較手法と比べて適応可能な通信量が約 8% 増加することが明らかとなった。

キーワード 波長分割多重、光ネットワーク設計、アトラクター選択にもとづく仮想網制御、物理トポロジー設計、進化適応性、可塑性

A Design Method of WDM networks based on Biological Evolution Model

Koki INOUE[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

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

Abstract Our research group has proposed a VNT control method that is adaptive to traffic changes. However, since performance of VNT is closely related to the physical infrastructure, a physical network should be designed so that the adaptive VNT control method can be enjoyed. In this paper, we propose a design method of WDM networks to have adaptability under various traffic fluctuation and traffic growth. Our method determines a set of nodes where transceivers should be added so that the network can obtain the plasticity. Evaluation results for the topology with 12 nodes show that our method can accommodate 8% more amount of traffic comparing with an existing method.

Key words Wavelength Division Multiplexing (WDM), Optical network design, VNT control based on attractor selection, physical topology design, evolvability, plasticity

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、中継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。

IP over WDM ネットワークは、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_t 個のトランスミッターと d_r 個の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。波長数制約を考慮しない場合、 d_t 個のトランスミッターが設置された IP ルータを始点とする光パスは最大 d_t 本まで設定可能であり、 d_r 個のレシーバーが設置された IP ルータを終点とする光パスは最大 d_r 本まで設定可能である。本稿では、同一の IP ルータに設置されたトランスミッター数 d_t とレシーバー数 d_r は等しいものとし、トランスミッターとレシーバーをまとめてポートと表記することとする。トラフィック需要は時々刻々と変化するため、 $d(=d_t=d_r)$ 個のポート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。

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 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 [1] を検討している。VNT 制御によってトラフィック変動への適応性が確保されるのに対し、トラフィック量の増大により資源不足となる場合には物理設備を増強する必要がある。そこで、IP ルータや OXC、光ファイバなどのネットワークの物理設備を増強することでトラフィック需要の増大に備えることが必要である。ポートを追加することで、ポート数制約による設定可能な光パス数の上限が緩和され、より大きなトラフィック需要を収容することが可能になる。ただし、物理ネットワーク設計と VNT 制御は相互に依存しており、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法の振る舞いを考慮せずに物理ネットワークを設計した場合、多様なトラフィックを収容する VNT の候補数が減少し、その結果、適応性を損なう恐れがある。したがって、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の適応性を損なわないネットワーク設備増強が必要である。

本稿では、様々な環境変動に対する進化適応性を備えた物理ネットワークを構築するための指針を得ることを目的とする。頑強性と可塑性を備えた生物の進化を説明する数理モデルを導入し、ネットワーク設備としてルータのポート数を増強する手法を提案し、その有効性を示す。

本稿の内容は以下の通りである。まず、2 章では、本稿で着目した生物の進化モデルの説明と、そのモデルにもとづくネットワーク設備増強手法を述べる。3 章では、性能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る。最後に 4 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2. 進化適応性を備えたネットワーク設備増強手法

生物の進化モデル [2] を IP over WDM ネットワークの設備増強に応用する。

2.1 進化モデル

生物は、頑強性 (robustness) と可塑性 (plasticity) を備えた進化によって環境に適応する。頑強性とは起こりうる外乱に対して自身の状態を保つことにより、正常に機能することができる性質である。一方、可塑性とは環境変動を自身の状態変化に反映させることにより、環境が大きく変動した際に自身の状態を大きく変えることができる性質である。また、進化過程における遺伝子変異により自身の状態を変える性質を進化適応性と呼ぶ。可塑性と進化適応性はともに外部摂動に対する可変性および感受性を表している。

文献 [2] では、頑強性と可塑性を両立する生物の進化を数理モデルとして定式化している。モデルの概要を以下で説明する。

・遺伝子 (gene): M 個の遺伝子 i は、それぞれ遺伝子発現量 $x_i (-1 \leq x_i \leq 1)$ を持つ。ある閾値 θ_i に対して $x_i > \theta_i$ となる場合、遺伝子 i が発現する。

・入力遺伝子 (input gene): 遺伝子 $1, 2, \dots, k_{inp}$ は環境からの入力として、遺伝子発現ダイナミクスによらずに発現量が決定される。

・目的遺伝子 (target gene): 遺伝子 $M - k + 1, M - k + 2, \dots, M$ は環境適応度の算出に用いられる。これら k 個の目的遺伝子が発現しているかどうかを環境への適応度を示す指標とする。

・遺伝子型 (genotype): 遺伝子は相互に活性または抑制の作用を施し、その相互関係を表す遺伝子活性抑制ネットワーク J_{ij} を構築する。 J_{ij} は $\{1, -1, 0\}$ を成分とするマトリクスである。 $J_{ij} = 1$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から発現活性を受ける関係にあり、 $J_{ij} = -1$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から発現抑制を受ける関係にある。そして、 $J_{ij} = 0$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から影響を受けない。このように、遺伝子発現ダイナミクスは遺伝子活性抑制ネットワークによって与えられる。

・表現型 (phenotype): 遺伝子型によって与えられた発現ダイナミクスに従って、遺伝子の発現量 \mathbf{x} が決定される。その結果、遺伝子の発現パターンが表現型として得られる。

・環境適応度 (fitness): 環境への適応度は、遺伝子発現パターンを引数とする関数 $F(\text{phenotype})$ によって算出される。

遺伝子発現量 x_i のダイナミクスは式 (1) で記述される。第 1 項は遺伝子活性抑制ネットワーク J_{ij} によって制御される確定的振る舞いを表している (γ は定数)。第 2 項はゆらぎ項で、環境からのノイズを表している。

$$\frac{dx_i}{dt} = \gamma \left\{ f \left(\sum_j J_{ij} x_j \right) - x_i \right\} + \sigma \eta_i \quad (1)$$

$f(z)$ は式 (2) で定義されるシグモイド関数である。 β はシグモイド関数の閾値近傍の傾きを表すパラメーターである。 δ は小さな正数であり、自発的な遺伝子発現量を表す。

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta(z - \theta_i))} + \delta \quad (2)$$

遺伝子活性抑制ネットワークの変異および淘汰が世代ごとに行われ、より環境適応度の高いものを後世に引き継がせることにより環境に適応していく。各世代では N 個の個体が存在し、そ

れぞれ異なる遺伝子活性抑制ネットワークを持つ。各個体に対して、それぞれの遺伝子活性抑制ネットワークによって与えられるダイナミクスに従い、遺伝子発現パターンを決定する。得られた遺伝子発現パターンに従って環境適応度を算出し、より優れた個体の選択および変異、そして劣っている個体の淘汰を行う。

2.2 進化モデルの設備増強手法への応用

本稿では、WDM ネットワーク設備増強として、ノードにおける IP ルータにポートを追加することを対象とする。提案する設備増強手法では、ポートを追加するノード集合を決定する。

表 1 のように進化モデルの要素を対応付けることで、WDM ネットワークの可塑性を評価する。対象とする WDM ネットワークのノード数を n とすると、設定できる光パスの候補数はノード対の組み合わせの総数に等しく、 n^2 個ある。遺伝子 i の発現量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n^2)$ は光バス候補 $l_i (i = 1, 2, \dots, n^2)$ とそれぞれ 1 対 1 に対応させる。各世代で、 x_i は式 (1) で表される発現ダイナミクスに従って値を決定する。その結果、 x_i が閾値 θ_i を上回り、遺伝子 i が発現する場合は光バス l_i を設定する。 x_i が閾値 θ_i 以下で遺伝子 i が発現しない場合は光バス l_i を設定しない。

WDM ネットワークの環境適応度をネットワークの通信品質にもとづいて算出する。文献 [2] では環境適応度を目的遺伝子の発現数としていたが、遺伝子発現量にもとづいて設定された光バスからなる VNT 上に想定トラヒックを収容させた時の最大ルータ利用率を用いる。ルータ利用率とは、各ノードの IP ルータが転送しているトラヒックの総量をルータの処理能力で割った値である。また、全ノードにおけるルータの処理能力は均一とし、ルータ利用率の最大値、すなわち最大ルータ利用率を環境適応度として用いる。最大ルータ利用率が小さい時はネットワーク全体で負荷が低く抑えられているため、システムの状態が良く、一方、最大ルータ利用率が大きい時は、あるノードでネットワーク負荷が高くなっており、システムの状態は悪くなる。すなわち、最大ルータ利用率が小さいほど、WDM ネットワークの環境適応度は良いものとする。具体的には、最大ルータ利用率 R_{max} に対して、環境適応度 $fitness = -R_{max}$ と定義した。

2.3 ポート数増強手法

どのノードにポートを追加すればもっとも高い可塑性が得られるかを判定するために、暫定的にポートを追加し、進化モデルを適用する。ポートを追加するノード集合を求める際に、ノード集合の全組合せに対する性能を試算すると組合せ数が爆発的に増大する。そこで、ヒューリスティックな手法として ADD アルゴリズム [3] を用いる。ADD アルゴリズムでは、ポートを追加する候補となるノードそれぞれに対して暫定的にポートを追加した場合のシステムの適応性を試算し、最も適応性の高いポート追加候補 1 箇所を確定する。これを既定のポート追加数に達するまで繰り返すことで、ポートを追加するノード集合を求める。以下にその手順を示す。

Step.1 ポートを追加する候補ノードそれぞれに対して以下を行う。

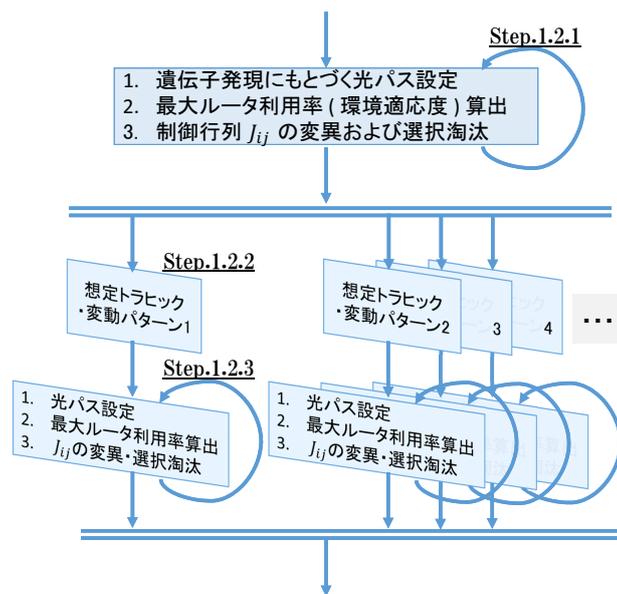


図 1 ポート増強手法 (Step.1.2)

表 1 進化モデルとポート数増強手法との対応関係

生物の進化	進化モデル	ポート数増強手法
表現型	遺伝子発現状態	光バス設定状況
発現ダイナミクス	遺伝子制御ネットワーク	制御行列
システム状態の良さ	環境適応度	最大ルータ利用率
外部摂動	入力遺伝子	ポート追加状況
環境変動	入力遺伝子変更	通信需要変動

Step.1.1 そのノードにポートを暫定的に追加する。

Step.1.2 図 1 のように、複数の想定トラヒック変動に対して以下を行い、環境適応度の推移を求める。

Step.1.2.1 制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を複数世代繰り返す。つまり、式 (1) で定まる光バス設定状況により構築される VNT 上にトラヒックを与え、その際の最大ルータ利用率にもとづいた制御行列 J_{ij} の変異および選択淘汰を行う。

Step.1.2.2 ある世代で想定トラヒック変動を与える。

Step.1.2.3 再び、制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を複数世代繰り返す。

Step.2 多くの想定トラヒックに対して最大ルータ利用率を低く抑えることができた場合、可塑性が高いと判断する。最も高い可塑性が観測されたノードにポートを追加する。既定のポート追加数に満たない場合は、Step.1 へ。そうでなければ、終了。

なお、入力遺伝子として n 個の遺伝子 $n^2 + 1, n^2 + 2, \dots, n^2 + n$ を与え、それぞれノード N_1, N_2, \dots, N_n のポート設置状況に対応させる。ノード N_i にポートが追加されている場合、入力遺伝子の発現量 x_{n^2+i} を 1 に設定し、ポートが追加されていない場合は x_{n^2+i} を 0 に設定する。

3. 性能評価

本章では、ポート数が増強された WDM ネットワーク上で、アトラクター選択にもとづく VNT 制御 [1] のトラヒック変動

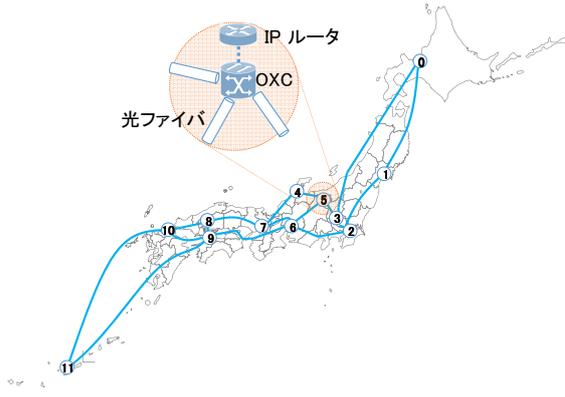


図2 JPN12モデル

に対する適応性をシミュレーションにより評価する。

3.1 評価環境

評価対象とするネットワークとして、日本の地理情報が考慮された JPNM(ジャパンフォトニックネットワークモデル)を用いる。ここでは、12ノードで構成されている JPN12モデルを用いる [4]。JPN12モデルの物理トポロジーとノード番号を図2に示す。各ノードは OXC と IP ルータで構成されており、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 ルータにポートを追加することによって、そのノードを端点として設定できる光パス数の上限が緩和される。初期状態での各ノードのポート数は、物理トポロジーの次数に2を加えた値とする。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、1対の IP ルータ間に設定できる光パスは最大1本までとし、波長数制約は考慮しないものとする。

次に、評価に用いるトラヒック需要モデルを説明する。まず、トラヒック需要の初期値設定について述べる。文献 [4] の都市人口を用いたグラビティモデルの分布に従って各ノード間のトラヒック需要の初期値を設定する。ノード i からノード j への初期トラヒック需要 Δ_0^{ij} を式 (3) により定義する。

$$\Delta_0^{ij} = G \times P_i \times P_j \quad (3)$$

ただしノード i に対応する都市の人口を P_i とし、定数 G の値は 1.46×10^{-14} とした。

次に、トラヒック需要の変動モデルについて述べる。トラヒック需要の変動モデルとして、式 (4) により定義される幾何ブラウン運動モデル [5] を用いる。各ノード間のトラヒック需要それぞれを、このモデルに従って独立に変動させる。

$$\Delta_t = \Delta_0 \cdot \exp\left((g - \frac{1}{2}v^2)t + v \cdot W_t\right) \quad (4)$$

Δ_t はタイムステップ t のトラヒック需要、 W_t は平均 W_{t-1} 、分散 1 の正規分布に従う乱数である。パラメーター g はトラヒック需要の平均的な増加度合いを表し、パラメーター v はトラヒック需要のランダム変動の大きさを表す。

3.2 比較手法

提案手法が環境変動に対して適応性を備えているかを評価する。比較手法として、現在のトラヒック需要に適した VNT

を構築できるようにポートを追加する手法を用いる。比較手法では、I-MLTDA (Increasing Multi-hop Logical Topology Design Algorithm) [6] を取り入れた ADD アルゴリズムによってポート追加位置を決定する。I-MLTDA とはトラヒック需要とホップ数の情報を用いて、最適な VNT を構築するヒューリスティックな VNT 制御手法である。I-MLTDA では、 $\Delta^{sd} \times (H^{sd} - 1)$ が最大となるノード s, d 間から優先的に光パスを設定する。ただし、 Δ^{sd} はノード s からノード d へのトラヒック需要、 H^{sd} はノード s からノード d へパケットを送る際に利用する最小ホップ数とする。比較手法によりポートを追加した WDM ネットワーク上では、ポート追加直後には、トラヒック需要に対してより適した VNT が設定されると期待される。

以下に示す ADD アルゴリズムを既定のポート追加数に達するまで行い、ポート追加位置を決定する。

Step.1 ポートを追加する候補となるノードそれぞれに対して以下を行う。

Step.1.1 そのノードにポートを暫定的に追加する。

Step.1.2 初期トラヒック需要 Δ_0^{ij} に対して I-MLTDA による VNT 設定を行い最大ルータ利用率を算出する。

Step.2 算出された最大ルータ利用率が最も小さい場合に適応性が最良とみなし、その候補ノードにポート追加を行う。既定のポート追加数に満たない場合は、Step.1 へ。そうでなければ、終了。

3.3 VNT 制御手法

評価に用いる VNT 制御手法として、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法 [1] を説明する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、式 (5) に表されるダイナミクスにより求まる遺伝子発現量 x_i の値により光パス l_i の設定状態を決定する。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。VNT の設定状態はアトラクターを持つ制御構造とゆらぎの2つの振る舞いによって駆動される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \left\{ \varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right\} + \eta \quad (5)$$

第1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る。ただし、関数 $\varsigma(z)$ はシグモイド関数とする。このアトラクターを持つ制御構造は、遺伝子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2項の η はゆらぎ項である。閾値を0とし、 $x_i \geq 0$ のときは光パス l_i を設定し、光パス $x_i < 0$ のときは設定しないように VNT を構築する。なお、 x_i の値域は $[-1, 1]$ とする。

IP ネットワークの通信品質を表す指標として、文献 [1] では最大リンク利用率が用いられている。しかし、ポート追加手法を評価する際はポート数増強による影響を反映させやすくするため、最大ルータ利用率を指標として用いる。すなわち本評価では、活性度 α を最大ルータ利用率 R_{max} を用いて式 (6) のよ

表 2 トラヒック変動のパラメーター

No.	g	v	No.	g	v
1	0.005	0.01	2	0.005	0.02
3	0.005	0.03	4	0.005	0.04
5	0.005	0.05	6	0.005	0.06

うに定義する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (R_{max} - \theta))} \quad (6)$$

γ は定数であり、 α の値域は $[0, \gamma]$ となる。 θ 、 δ は定数であり、 α は θ 付近で急激に 0 に近づき、そのときの傾きはパラメーターによって定まる。最大ルータ利用率 R_{max} が θ より大きい場合は、IP ネットワークの通信品質が悪いとみなし、 α を急激に 0 に近づけ、ゆらぎによりシステムは新たなアトラクターを探索する。一方、 R_{max} が θ よりも小さい場合は、IP ネットワークの性能が良いとみなし、アトラクターに収束するように制御を行う。ここでは、 $\gamma = 1$ 、 $\theta = 0.5$ 、 $\delta = 50$ としている。

アトラクター選択にもとづく VNT 制御は以下の手順で行う。

- (1) 定期的に IP ネットワークのルータ利用率を計測する。
- (2) 計測したルータ利用率から活性度を決定する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法ではこの活性度により IP ネットワークの通信品質を判断する。
- (3) 活性度をもとに、アトラクター選択の確定的な振る舞い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もとに VNT を構築する。
- (5) IP ネットワークではその VNT を使いトラヒックの伝送を行う。VNT の構造やトラヒック需要の変動によりルータ利用率が変化する。
- (6) 再びルータ利用率を計測し、制御を行う。

3.4 評価結果

ポート追加を行うのは 12 ノード中の 3 ノードとし、それらのノードに各 4 個ずつ、計 12 個のポートを追加する。提案手法ではノード {1, 5, 0}、比較手法ではノード {3, 6, 7} にポートを追加すると求めた。トラヒック変動パターンとして、表 2 に示したパラメーターセットそれぞれに対して式 (4) に従うトラヒック変動を 1000 パターンずつ生成した。これらのトラヒック変動パターンに対して、提案手法と比較手法によるポート追加を行った WDM ネットワーク上でアトラクター選択にもとづく VNT 制御を行い、その性能を比較評価する。

評価指標として、VNT 制御有効期間を用いる。VNT 制御有効期間とは、タイムステップ 0 で開始したアトラクター選択にもとづく VNT 制御において、活性度が著しく低下し最大ルータ利用率を低く抑えることが不能となるまでのタイムステップ数とする。具体的には 5 タイプステップ連続で最大ルータ利用率が閾値 0.544 を超えた時点のタイムステップ数とする。閾値 0.544 は活性度 α が約 0.1 となる最大ルータ利用率である。

例として、パラメーターセット 6 のトラヒック変動 1000 パターン中のある 1 パターンに対して VNT 制御を行った結果を図 3 に示す。比較手法によりポート追加を行った場合、タイムス

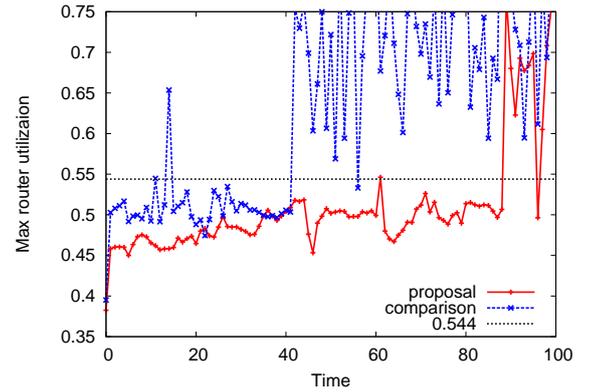


図 3 最大ルータ利用率の推移

テップ 15 あたりで最大ルータ利用率が閾値を一時的に超えているが、次のタイムステップでは再び良好なアトラクターが発見され最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。その後、タイムステップ 40 付近まで最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。これは、アトラクター選択にもとづく VNT 制御によって、トラヒック変動に適した VNT を構築できていることを示している。しかし、それ以降では最大ルータ利用率が閾値を上回り、大きく振動している。アトラクター選択にもとづく VNT 制御では、最大ルータ利用率が大きくなると活性度 α が 0 に漸近し、ゆらぎによる確率的振る舞いが制御システムを支配することで新たな VNT の探索を行う。しかし最大ルータ利用率を低く抑えられる VNT が発見できない場合は、結果としてランダムな VNT が構築されることになる。つまり、最大ルータ利用率が閾値以上で振動しているのは、アトラクター選択にもとづく VNT 制御によるトラヒックの収容が機能しなくなったことを示している。一方、提案手法によりポート追加を行った場合、タイムステップ 60 あたりで一時的に閾値を上回っているが、およそタイムステップ 90 まで最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。タイムステップ 90 以降では最大ルータ利用率が振動し、VNT 制御が機能しなくなっている。評価指標である VNT 制御有効期間は、一時的に閾値を上回る場合を除くために 5 回連続で閾値を上回ったタイムステップとしている。VNT 制御有効期間の観点から比較すると、提案手法ではおよそ 95、比較手法ではおよそ 45 となっており、提案手法によりポート追加を行った場合の方がより長い期間にわたりトラヒック変動に適応できていることがわかる。

次に、様々なトラヒック変動パターンに対する有効性を説明する。各パラメーターセットごとに、1000 パターンのトラヒック変動に対する VNT 制御有効期間の分布を求める。例として、パラメーターセット 6 に対する結果を図 4 に示す。1 つのトラヒック変動パターンに対して、提案手法によるポート追加を行った場合の VNT 制御有効期間を横軸、比較手法によるポート追加を行った場合の VNT 制御有効期間を縦軸として、その座標をプロットしている。多くのトラヒック変動パターンに対して、提案手法によるポート追加を行った場合の方が、比較手法によるポート追加を行った場合よりも、VNT 制御有効期間

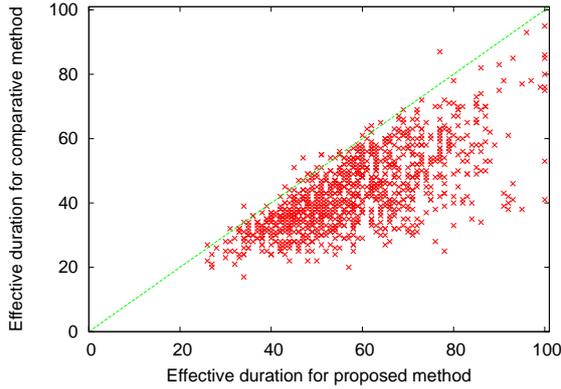


図 4 VNT 制御有効期間の分布: $g=0.005, v=0.06$

が大きいことがわかる。また、パラメータセット 6 以外においても、同様の傾向が示されたことを確認している。以上より、様々なトラフィック変動パターンに対して、より長い期間にわたり最大ルータ利用率を低く抑えることが可能なポート追加が行われていることが分かる。

また、提案手法と比較手法のどちらの方が VNT 制御有効期間の観点で優れているかを基準としてトラフィック変動パターンを分類した。そして、そのパターン数を比較した。パラメータセットごとに VNT 制御有効期間の大小関係によりトラフィック変動パターンを分類した度数分布を表 3 に示す。表 3 では、それぞれのパラメータセットについて 1000 通りのトラフィック変動パターンのうち、1) 提案手法によるポート追加を行った場合の VNT 制御有効期間が比較手法によるポート追加を行った場合の VNT 制御有効期間より上回っているパターン数、2) VNT 制御有効期間が等しいパターン数、3) 比較手法によるポート追加を行った場合の方が VNT 制御有効期間が上回っているパターン数を記している。表 3 を見ると、どのパラメータセットにおいても提案手法の方が優れていることがわかる。また、それぞれのパラメータセットにおいて、1000 通りのトラフィック変動パターンに対する VNT 制御有効期間の平均を求めた。その結果を表 4 に示す。どのパラメータセットにおいても、提案手法によるポート追加を行った場合の方が比較手法によるポート追加を行った場合よりも、平均 VNT 制御有効期間が約 15 タイムステップ大きいことがわかる。幾何ブラウン運動モデルにおいてタイムステップ dt が経過すると、通信量は平均して $\exp(g \cdot dt)$ 倍になる。ここでは、 $g = 0.005$ としているので、タイムステップ 15 が経過すると通信量は平均して 1.077 倍になる。よって、提案手法によりポート追加を行った場合の方が約 8% 増のトラフィック量まで適応可能であることがわかる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、トラフィック需要の増大に適応するためのネットワーク設備増強手法を提案した。提案手法では、生物の可塑性を表現する進化モデルを応用して、WDM ネットワークにおいてポート追加を行うべきノード集合を求めている。提案手法によるポート数増強を行うことでアトラクター選択にもとづく

表 3 VNT 制御有効期間の比較

パラメータセット	提案手法の方が大きいパターン数	両手法で等しいパターン数	比較手法の方が大きいパターン数
1	993	2	5
2	987	1	12
3	990	4	6
4	979	4	17
5	978	6	16
6	967	14	19

表 4 VNT 制御有効期間の平均

パラメータセット	提案手法	比較手法
1	55.883	40.52
2	56.034	40.985
3	56.31	41.229
4	57.266	41.756
5	57.663	42.316
6	58.353	43.312

VNT 制御の適応性を維持し、より多様なトラフィック需要増大に対して適応できることが明らかとなった。今後は、周期的な設備増強を行った場合の性能を評価し、サステナブルなネットワーク設計としての性能を示す予定である。また、本報告では、12 ノードの物理トポロジーを対象として評価を行ったが、より大規模なネットワークにおける適応性の評価が必要である。さらに、ポートの追加だけでなく、物理リンクの追加するように提案手法を拡張し評価をする予定である。

文 献

- [1] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.28, no.11, pp.1720–1731, June 2010.
- [2] K. Kaneko, "Evolution of robustness and plasticity under environmental fluctuation: Formulation in terms of phenotypic variances," Journal of Statistical Physics, vol.148, no.4, pp.687–705, Sept. 2012.
- [3] A.A. Kuehn and M.J. Hamburger, "A heuristic program for locating warehouses," Management Science, vol.9, no.4, pp.643–666, July 1963.
- [4] 坂野 寿和, 築島 幸男, 長谷川 浩, 釣谷 剛宏, 廣田 悠介, 荒川 伸一, 戸出 英樹, "日本の地域特性を考慮したフォトニックネットワークモデルの検討," 電子情報通信学会技術研究報告 (PN2013-1), vol.113, no.91, pp.1–6, June 2013.
- [5] Y.d' Halluin, P.A. Forsyth, K.R. Vetzal, "Wireless network capacity management: A real options approach," European Journal of Operational Research, vol.176, no.1, pp.584–609, June 2007.
- [6] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.8, no.5, pp.598–607, Oct. 2000.