

特別研究報告

題目

ゆらぎ原理にもとづいた VNT 制御における
アトラクター集合の動的更新手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

坂本 昂輝

2016 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

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、波長レベルでの信号処理を行い、仮想網 (VNT: Virtual Network Topology) を構築し、その上に 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。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い VNT 候補をアトラクターとすること、および、トポロジー特性が異なる 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、今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ちたす可能性がある。そこで本報告では、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。提案手法では、トラフィック需要の情報を用いてオフライン計算による評価によって、今現在の環境に対して不適切な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評価の結果、既存の手法により選定されたアトラクターのみを用いる場合と比較して、提案手法では制御成功率が最大約 40 % 改善され、制御に要する時間が最大約 70 % 削減されることがわかった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing)、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

目次

1	はじめに	5
2	WDM ネットワークにおける VNT 制御手法	7
2.1	WDM 技術	7
2.2	VNT と物理トポロジー	9
2.3	アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法	9
2.3.1	アトラクター選択モデル	9
2.3.2	自己組織型 VNT 制御手法	12
2.4	アトラクター設計手法	15
2.4.1	トポロジー特性にもとづくアトラクター設計手法	15
2.4.2	階層化アトラクター設計手法	19
3	アトラクター集合の動的更新手法の提案	21
3.1	アトラクター更新とアトラクター選択	21
3.2	アトラクター更新に用いる環境情報	21
3.3	アトラクター更新手法	22
3.3.1	環境不適合なアトラクターの抽出	23
3.3.2	制御行列の更新	23
4	性能評価	25
4.1	評価環境	25
4.2	評価指標	26
4.3	評価結果	27
4.3.1	アトラクター集合の更新	27
4.3.2	VNT 制御性能の比較評価	28
5	おわりに	33
	謝辞	34
	参考文献	35

目 次

1	WDM 伝送システム	7
2	IP over WDM : ポイントポイント間通信	8
3	IP over WDM ネットワーク	10
4	物理トポロジー	10
5	光パスの設定例	11
6	VNT	11
7	アトラクター選択の VNT 制御への適用	13
8	位相同型な VNT の例	16
9	VNT 候補の分類	17
10	VNT 候補群の統合	18
11	物理トポロジーの縮約	20
12	階層化アトラクター設計手法の概要	20
13	USNET	26
14	各アトラクターにおける VNT 制御の制御回数の分布	29
15	30 回の VNT 制御後の最大リンク利用率	30
16	各アトラクター集合を用いた VNT 制御の制御回数の分布	32

表 目 次

1	トラヒックパターン	25
2	30 回の VNT 制御後の制御成功率	28

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応し、IP トラフィックを効率的に光ネットワークに収容するための通信形態として、波長ルーティングを用いた仮想網 (VNT) 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、波長のチャンネル (以降、光パス) をノード間に構築する。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仮想網を構築し、その VNT 上に IP トラフィックを収容するものである。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]。文献 [4] では、一日のトラフィック需要の変化に着目し、日中のオンピークとオフピークのトラフィック需要変化に適応する VNT 再構成手法を提案している。さらには、時間オーダーでのトラフィック需要の変化に対して適応的に VNT を再構成する手法の検討もなされている。

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、適応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応的に 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収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アイデアは、トポロジー特性が良い VNT 候補をアトラクターとすること、およびトポロジー特性が異なるもの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 候補群として分類し、各 VNT 候補群から Edge betweenness centrality が最もとも良好なものを 1 つ選び、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集合を求める手法であり、今現在のトラヒック量やトラヒ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。すなわち、トポロジー特性が良好であったとしても、今現在のトラヒックパターンに対して不適切な VNT 候補もアトラクターとしており、その結果として良好な解を発見するまでの時間の増大をもたらしているものと考えられる。

本報告では、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、アトラクターの更新に関する指針を得る。ここで言うアトラクターの更新とは、今現在のトラヒックパターンに対して不適切な VNT 候補を一時的に除外し、必要に応じて新たなアトラクターを用意することである。まず今現在のトラヒックパターンに対して不適切なアトラクターを除外することで得られる効果を明らかにする。アトラクターの選定は、VNT 制御の制御周期よりも長くとることができる。そのため、トラヒック需要に関する情報を取得できるものとし、オフライン計算により不適切なアトラクターを求め、これを除外する。また、オフライン計算により今現在のトラヒックパターンに適したアトラクターを求め、これを追加することを考える。これらのアトラクターの更新によって、良好な解を発見するまでの時間が削減されることを明らかにする。

本報告の構成として、まず 2 章では提案手法の説明に必要となる既存研究、WDM ネットワークにおける VNT 制御手法について述べる。次に 3 章で提案手法であるアトラクター集合の動的更新手法について説明し、4 章でトラヒックパターンに対するアトラクターの性能評価および提案手法の評価を行う。最後に、5 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

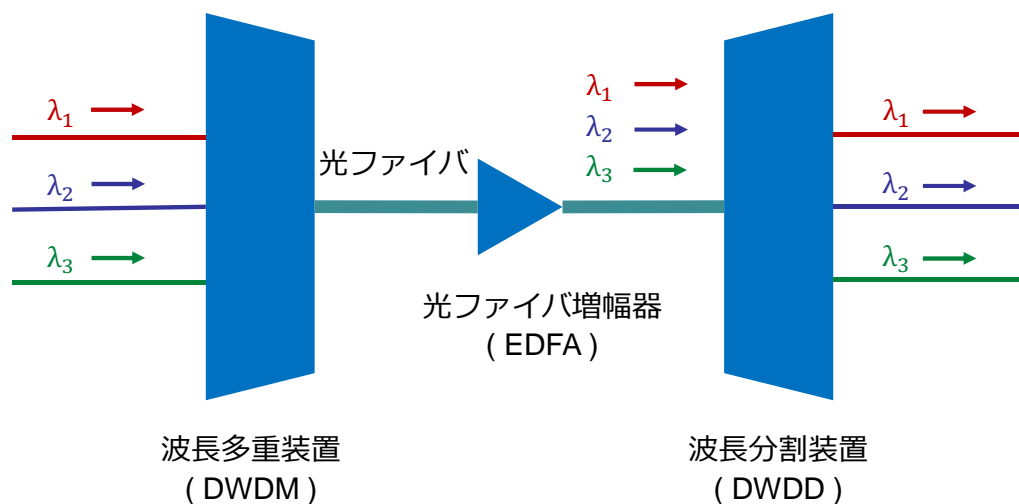


図 1: WDM 伝送システム

2 WDM ネットワークにおける VNT 制御手法

本章では、まず WDM 技術を説明し、本報告で対象とする光基盤ネットワークである IP over WDM ネットワークについて説明する。次に、IP over WDM を使って仮想網 (VNT) と物理トポロジーという概念を示す。IP トラフィックを効率的に伝送するために、VNT 制御手法が検討されていることを述べ、VNT 制御に対してアトラクター選択モデルを適用し、柔軟性を獲得させる。最後に、アトラクター選択で使用されるアトラクター設計手法に関して説明する。

2.1 WDM 技術

WDM 伝送システムは、波長多重装置 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexer)、波長分割装置 (DWDD: Dense Wavelength Division Demultiplexer)、光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) により構成される。データを送信する場合、まず送信側においてデータを光信号に変換する。次に、波長多重装置によって各波長を多重化し、多重化された光信号をファイバに送り出す。光信号はファイバ内を伝搬し、受信側に到着する。受信側では、多重化された光信号を波長分波器によって各波長に分波し、電気信号に変換した後データを取り出す。このように、WDM 技術は、1 本の光ファイバ上において並列にデータを伝送することによって大容量通信を実現する。なお、ファイバ内では光信号が減衰して波形が劣化する。そのため、光信号を電気信号に変換することなく光のまま信号の増幅を行う光ファイバ増幅器を伝送路の途中に配置することによって光信号を増幅している。

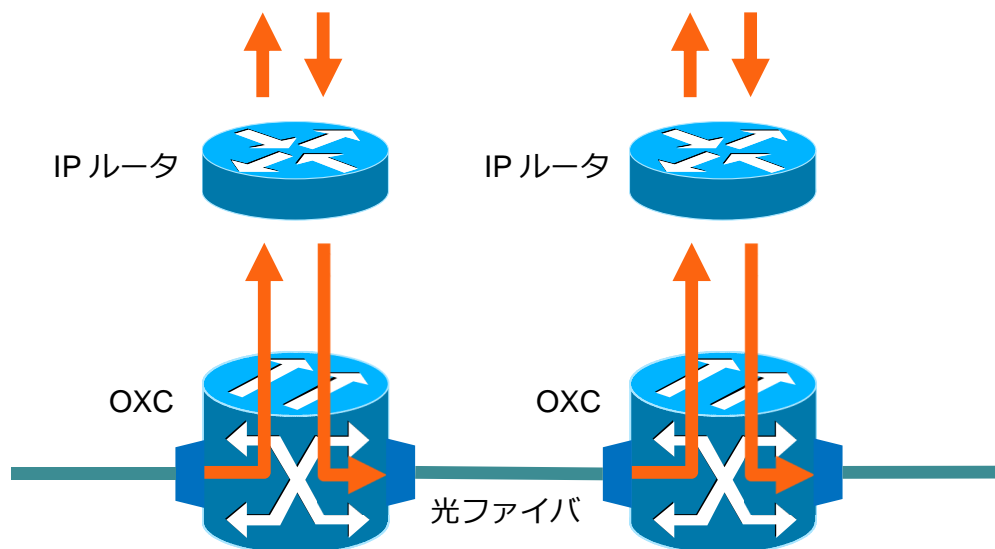


図 2: IP over WDM : ポイントポイント間通信

次に、WDM 上において IP トラフィックを伝送する、IP over WDM ネットワークについて説明する。IP over WDM ネットワークに関して様々な利用形態が議論されているが、その一つに図 2 のようにルータ間のポイントポイント間通信に WDM 技術を利用することで通信回線の大容量化を図っている。

ポイントポイント間通信に WDM 技術を導入することで、通信回線は確実に大容量化されるが、光ファイバに流れるすべての IP トラフィックをルータが扱うことになり、ルータにおける電気処理がボトルネックとなる。そのため、WDM ネットワーク上において光パスを設定し、WDM ノードにおける電気処理によるコストを軽減することが考えられている。ここで、光パスとは、ノードにおいて入力側の波長と出力側の波長をノード内の光スイッチによって連結させ、送信ノードから受信ノードまでの連結された一連の波長によって形成されるチャネルのことである。WDM ネットワーク内において、すべてのエンドノード間に光パスを設定することができれば、WDM ネットワーク内部において電気処理は不要になる。しかし、そのためには数多くの波長が必要となる。一方、WDM ネットワーク内部においても光パスの終端を許すとすれば、IP ルータ上での電気処理による経路制御が一部必要になる。しかし、IP は光パスによって構築される仮想的なトポロジ上で本来の経路制御などのプロトコル処理を行えばよいので、IP の変更が必要ないという利点は残される。

図 3 は、本研究本報告で想定する IP over WDM ネットワークの図である。図 3 に示すように、VNT (Virtual Network Topology : 仮想網) 制御によって制御するネットワークは 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

光ファイバから成る。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、これらの IP ルータと光パスから VNT の構造が決定される。

2.2 VNT と物理トポロジー

図 4 に示すような、4 つのノードから構成されるネットワークを考える。ファイバにおいて利用可能な波長は λ_1 、 λ_2 の 2 波長とする。この時、図 5 のようにノード N2 において λ_2 を連結することによって、ノード N1、N3 間に波長 λ_2 を用いて光パスを設定する。図 5 のように光パスを設定した場合、ノード N1 とノード N3 は論理的に隣接しているため、IP は図 6 に示すようなネットワーク上で動作することになる。このように、光パスを利用して論理的に構成されるネットワークを VNT と呼ぶ。また図 6 に対して、図 4 に示されるようなネットワークのことを物理トポロジーと呼ぶ。

2.3 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。

2.3.1 アトラクター選択モデル

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応性を実現している。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。

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

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 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、 η がゆらぎである。システムの活性度を表すのは α 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、 α 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 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。また、システムのコンディションが悪く、 α の値が小さい場合は、 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

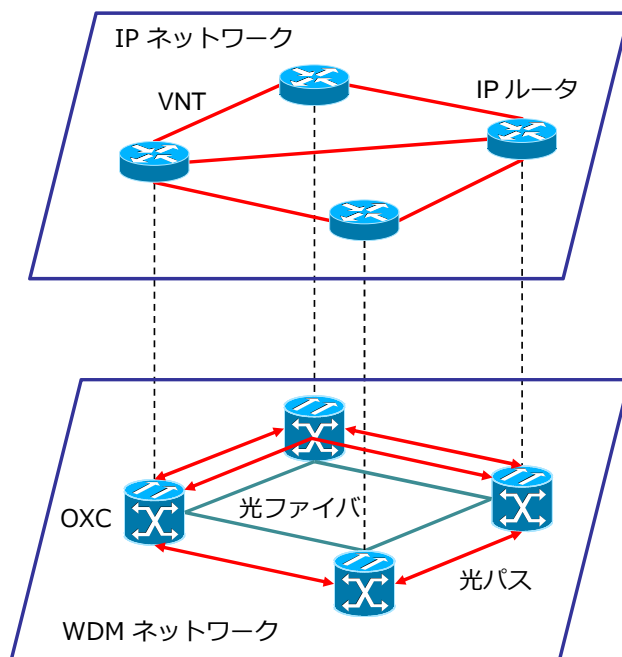


図 3: IP over WDM ネットワーク

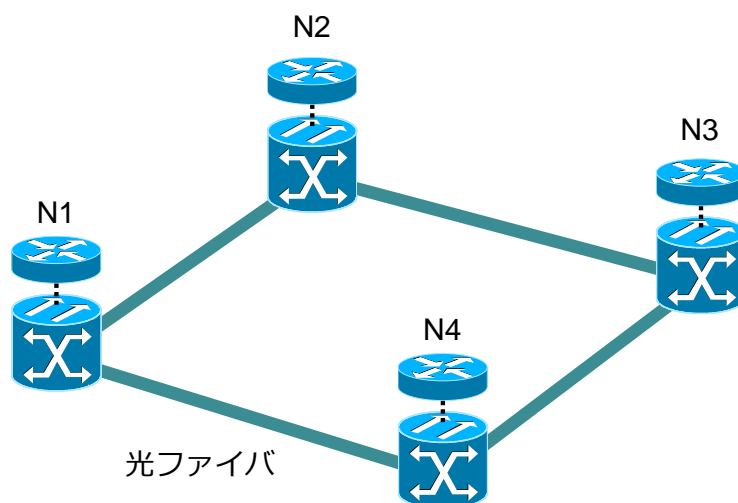


図 4: 物理トポロジー

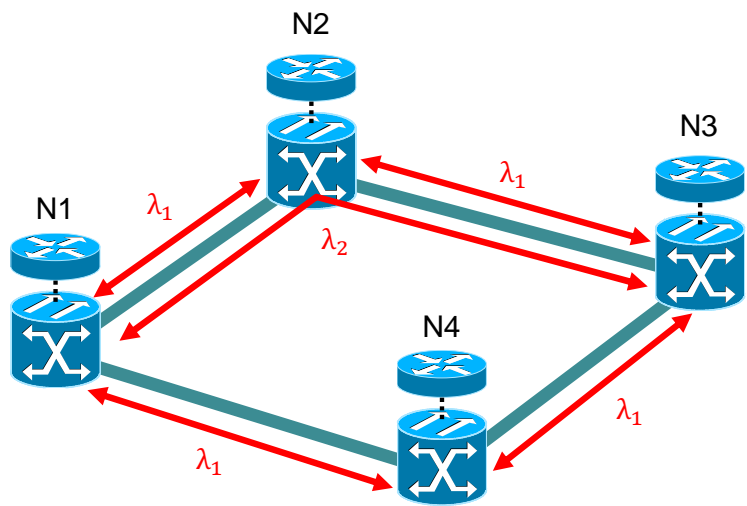


図 5: 光パスの設定例

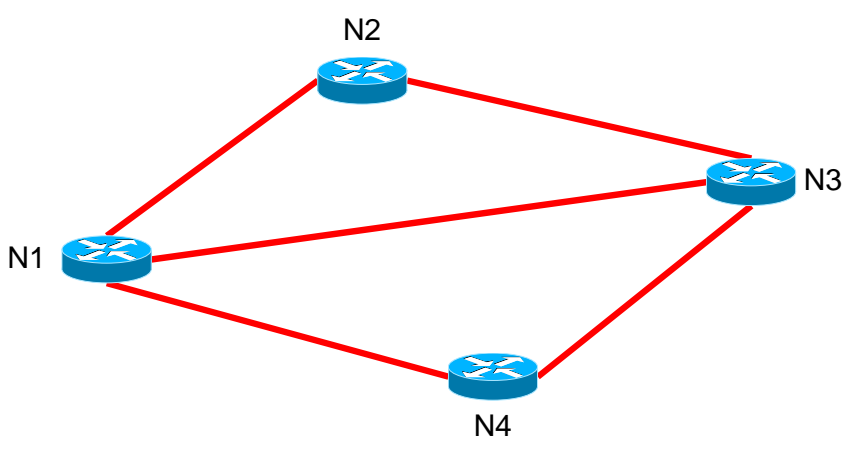


図 6: VNT

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。

遺伝子

遺伝子 $x_i (\in \mathbf{x})$ 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、 $\varsigma(z) = \tanh\left(\frac{\mu}{2}z\right)$ 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、これは遺伝子間の相互作用によって定められる。第2項の η は確率的動作を示すゆらぎ項である。

活性度

活性度 α はシステムのコンディションを示す。 α 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。 α が低下すると、アトラクターを持つ制御構造が x_i の変化に与える影響が小さくなる。その結果、ゆらぎ η が x_i に与える影響が相対的に大きくなり、 x_i はゆらぎによってランダムに変化する。 x_i が変化すると、システムの状態が変化する。システムの状態の変化によって α が大きくなると、アトラクターを持つ制御構造が x_i の変化に与える影響が大きくなり、システムはアトラクターを持つ制御構造により、アトラクターに強く引きつけられる。

2.3.2 自己組織型 VNT 制御手法

アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、図 7 に示すようにシステムの状態 \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。

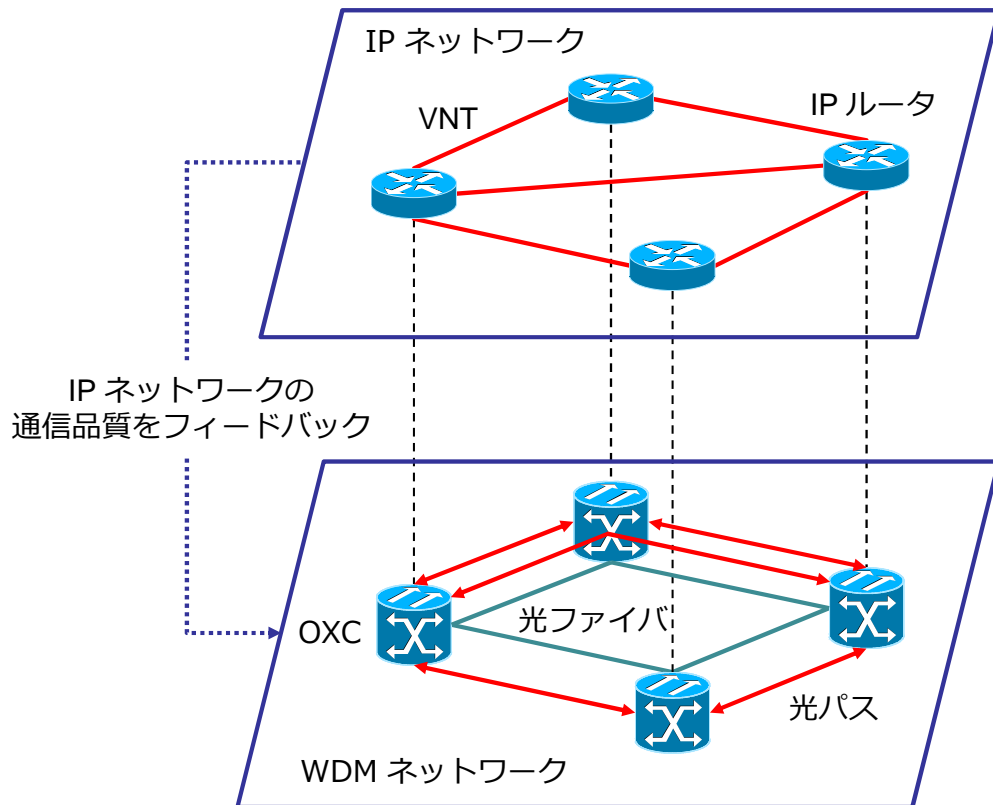


図 7: アトラクター選択の VNT 制御への適用

遺伝子発現による光パスの制御

光パス候補 i の設定状況を遺伝子 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、遺伝子 x_i の値により l_i の設定状況を決定する。ここでは、式 (3) のように閾値を 0 とし、 $x_i \geq 0$ のときは l_i を 1 とし、それ以外の時は 0 とする。

$$l_i = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

VNT 制御の活性度

活性度 α は、ネットワークのコンディションを表す指標であり、多くの既存研究で VNT 制御の性能指標として利用されている最大リンク利用率を用いる。最大リンク利用率を u_{max} とし、活性度 α を式 (4) のように定義する。これは、最大リンク利用率 u_{max} が閾値 θ を超えると活性度 α が低下する関数である。 γ と δ はパラメータであり、 γ は活性度の上限を、

δ は u_{max} が θ 近傍に位置する際の傾斜を決定する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{max} - \theta))} \quad (4)$$

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 (5) で計算される。

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

ここで、 \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。

ポート数制約

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、光パス l_i に設置した遺伝子が発現レベル x_i を持ち、式 (3) にもとづいて光パス l_i を設定するかを決定する。ここでは、ファイバー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ー数とレシーバー数が光パス数を制約するものとする。光パス l_i に関して、 l_i がノード s からノード d への光パスであるとする。このとき、式 (3) に基づき l_i が 1 の場合に、ノード s のトランスシーバーが余っており、かつ、ノード d のレシーバーが余っているときに光パスを構築する。

2.4 アトラクター設計手法

提案手法で使用するアトラクターの設計方法を説明する。提案手法で用いるアトラクター設計手法として、文献 [11] の手法を用いる。

2.4.1 トポロジー特性にもとづくアトラクター設計手法

本項では、アトラクターのトポロジー特性にもとづいてアトラクターを設計する。アトラクターとして選ばれる可能性のある VNT を VNT 候補と表現する。VNT 候補はトラヒック需要の急激な変動に対し、対応可能であるべきである。したがって、VNT 候補を適切に設計し、広範な多様性をもたせる必要があるという問題に直面する。

こうした問題に対応するため、本項のアトラクター設計手法では VNT 候補の特性に着目する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法によって構築される VNT は、最終的に複数のアトラクターの内の 1 つに収束するため、複数のアトラクターの内のどれかが現在のトラヒック需要を収容可能であるべきである。言い換えると、VNT 候補間で収容可能なトラヒック需要は異なることが望ましい。したがって、本項のアトラクター設計手法では VNT 候補をその特性にもとづいて群に分類し、各 VNT 候補群から 1 つずつアトラクターを選出する。多様な特性をもつ VNT 候補を限られた数だけ用意することで、アトラクター選択は多種多様な VNT を探し出すことが可能となる。その結果、VNT 制御において早急に解を発見し、トラヒック変動に対してより適応的な VNT 制御を実現する。以下に、本項のアルゴリズムを示す。

Step 1. 与えられた VNT にもとづいて位相同型の VNT 候補を列挙

Step 2. 列挙された VNT 候補をその特性にもとづいて群に分類

Step 3. 分類した各群から 1 つずつ VNT 候補を選出

本項のアルゴリズムでは、あらかじめある 1 つの VNT g が与えられるとする。また、全対地間トラヒック需要を示す行列 T (以下、トラヒックマトリックス) にもとづいて VNT g を構築するとき、ヒューリスティックな手法を用いるとする。ただし、VNT 候補を設計するためには T を用いるが、VNT 制御手法においては T は使用しない。

Step 1. では、VNT g に対して位相同型の VNT を計算する。位相同型の VNT は、VNT g の全ノードを交換することで生成される。位相同型の VNT を図 8 を用いて説明する。図 8 において、VNT g_1 は 5 つのノード N_0, N_1, \dots, N_4 から構成され、VNT g_2 や g_3 は g_1 の位相同型である。位相同型の VNT g_2 は、 g_1 のノード N_0 を N_1 へ、 N_1 を N_2 へ、 N_2 を N_3 へ、 N_3 を N_4 へ、最後に N_4 を N_0 へ変換することによって生成されている。また、

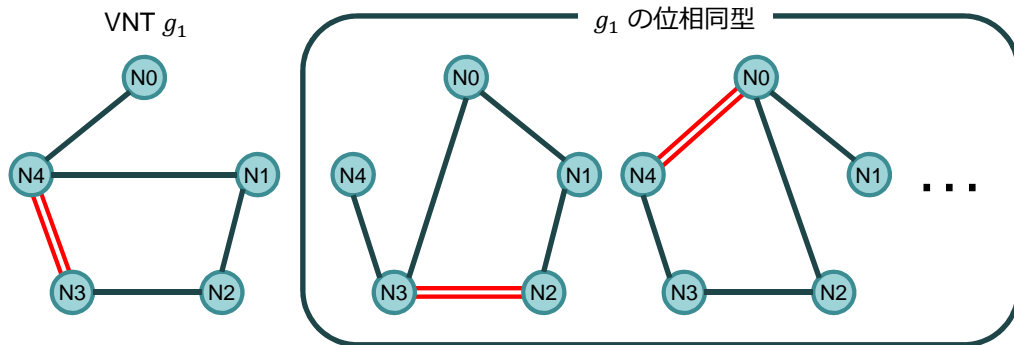
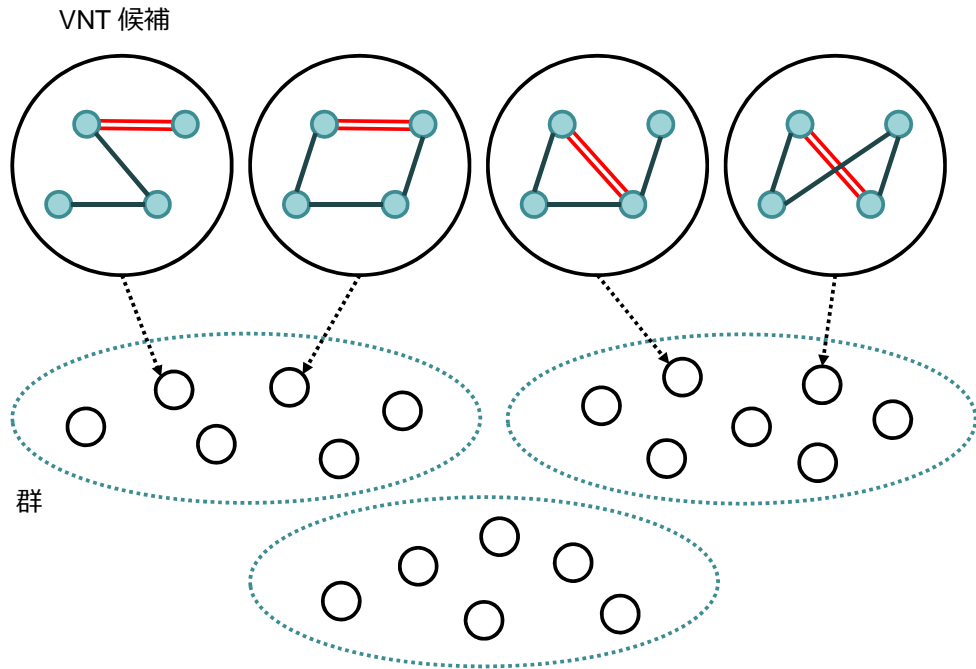


図 8: 位相同型な VNT の例

位相同型の VNT g_3 は、 g_1 のノード $N0$ を $N4$ へ、 $N4$ を $N3$ へ、 $N3$ を $N2$ へ、 $N2$ を $N1$ へ、最後に $N1$ を $N0$ へ変換することによって生成されている。しかし、各ノードに配置された IP ルータのポート数のような、物理ネットワークの資源の制約を満たさない VNT 候補は除外されるとする。

図 8 において、VNT g_1 はトラヒックマトリックス T_1 にもとづき、ヒューリスティックな手法によって構築され、また $N3$ と $N4$ を結ぶ二重線のリンクにおけるトラヒック量が最も大きいとする。VNT g_1 は T_1 にもとづき、ヒューリスティックな手法によって構築されるため、VNT g_1 は T_1 を収容可能であるとする。次に、あるトラヒックマトリックス T_2 は、 T_1 の各行を 1 つずつずらし、かつ各列を 1 つずつずらしたものである。具体的には、まず T_1 の 1 行目を T_2 の 2 行目に、 T_1 の 2 行目を T_2 の 3 行目に転換し、最後に T_1 の最終行を T_2 の 1 行目に転換する。次に、上述の行における操作と同様の操作を列においても行う。位相同型の VNT g_2 は、 g_1 のノード $N0$ を $N1$ へ、 $N1$ を $N2$ へ、 $N2$ を $N3$ へ、 $N3$ を $N4$ へ、最後に $N4$ を $N0$ へ変換することによって生成されているため、ノード $N2$ と $N3$ の間のリンク上のトラヒック量が最も大きくなり、VNT g_2 は T_2 を収容可能である。つまり、トラヒックマトリックスの値が大きすぎなければ、いずれかの位相同型の VNT が変動するトラヒック需要を収容可能であると期待できる。以下では、VNT g と計算された VNT 候補の群を G と表現する。

Step 2. では、 G に属する VNT 候補の特性にもとづき、VNT 候補を群に分類する。トポロジー特性にもとづくアトラクター設計手法では、VNT 候補の特性としてエッジ媒介中心性 (Edge betweenness centrality) を用いる。エッジ媒介中心性とは、そのリンクを通る全対地間の最短ルートの数である。図 9 に示すように、ボトルネックとなるリンクが異なる VNT 候補を、異なるグループに分類する。ボトルネックリンクとは、VNT 候補を構成するリンクの中で、エッジ媒介中心性が最大となるリンクを指す。アトラクターとして選出された各



同じボトルネックリンクをもつ VNT 候補を同じ群に分類

図 9: VNT 候補の分類

VNT 候補のボトルネックリンクが異なっていると、対応できないトラヒックパターンが減り、様々なトラヒックパターンを収容可能となることが予想される。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、最大リンク利用率は IP ネットワークのコンディションを示す。リンク利用率が高くなるリンクは、エッジ媒介中心性が大きくなる可能性が高い。したがって、同じボトルネックリンクをもつ VNT 候補は同じ群に分類する。以下に、VNT 候補群の定義に使用する表現を説明する。

- $p = (s, d)$: 起点ノード s と終端ノード d のペアを示す識別子
- l_p : ノードペア p の間を結ぶリンク
- $C(g_i, l_p)$: VNT 候補 g_i を構成するリンク l_p のエッジ媒介中心性の値

上記を用いて、 l_p をボトルネックリンクとする VNT 候補群 G_p を以下のように定義する。

$$G_p = \{g_i | g_i \in G, C(g_i, l_p) = \max_q C(g_i, l_q)\} \quad (6)$$

さらに、各 VNT 候補群のボトルネックリンクにおけるトラヒック量に密接な関連があれば、その VNT 候補群を統合する。2つのリンクを流れるトラヒックが次数の低いノードを

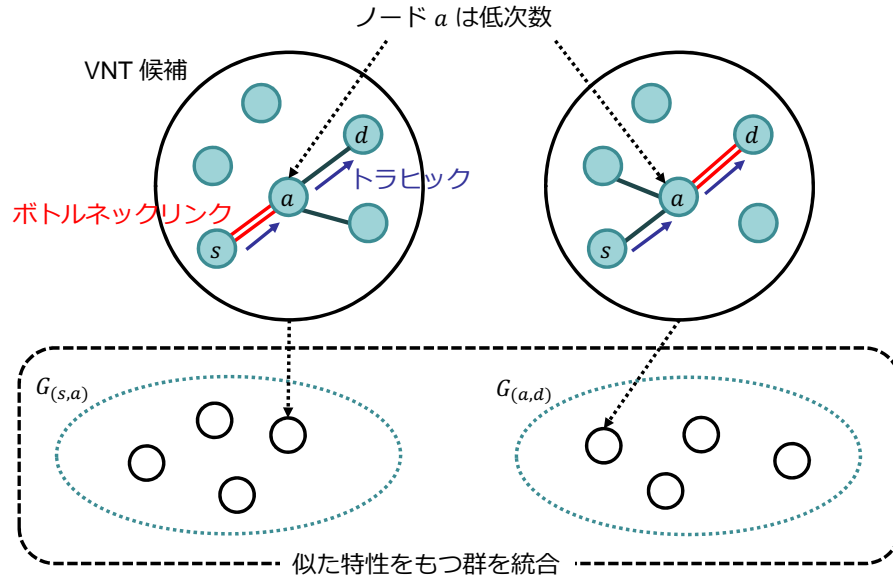


図 10: VNT 候補群の統合

経路しているとき、2つのリンクを流れるトラヒック量には高い相関性がある。図 10 を用いて、VNT 候補群を統合するときに満たすべき条件について説明する。図 10 において、起点ノード s から終端ノード d へ次数の低いノード a を経由してトラヒックが流れるとき、 $l_{(s,a)}$ 上のトラヒックの一部は $l_{(a,d)}$ 上を流れる。つまり、もし $l_{(s,a)}$ がボトルネックリンクであれば、 $l_{(a,d)}$ 上を流れるトラヒック量が多い可能性が高い。したがって、VNT 候補群 $G_{(s,a)}$ と $G_{(a,d)}$ を、似た特性をもつ VNT 候補群として扱う。VNT 候補群を次のように統合する。

$$G_{(s,d)} \leftarrow G_{(s,a)} \cup G_{(a,d)} \cup G_{(s,d)} \quad (7)$$

ここでは、ノード a の次数は低いものとする。式 (7) において、 $G_{(s,d)}$ に属する VNT 候補は、 $G_{(s,a)}$ と $G_{(a,d)}$ に属する VNT 候補の特性と似た特性をもつとしている。その理由は、 $l_{(s,a)}$ や $l_{(a,d)}$ がボトルネックリンクであるとき、 $l_{(s,d)}$ 上のトラヒック量が多い可能性が高いからである。また、ノード a の次数が低いと、 $l_{(s,a)}$ と $l_{(a,d)}$ 上のトラヒック量は密接な関連があるため、各ノードの次数の昇順にノード a 、 s 、 d を選ぶ。しかし、各群は様々な VNT 候補を含んでいるため、その群に含まれるすべての VNT 候補における各ノードの次数の平均にもとづいてノード a 、 s 、 d を選ぶ。このようにして、繰り返し VNT 候補群を統合する。

Step 3. では、各 VNT 候補群の中から 1 つずつ VNT 候補を選出する。選出する VNT 候補は、各 VNT 候補群の中でエッジ媒介中心性の値が最小のものとする。なぜならば、エッジ媒介中心性が小さければ小さいほど、最大リンク利用率を低く抑えられる可能性が高くなるからである。

2.4.2 階層化アトラクター設計手法

2.4.1 項で示したアルゴリズムは、物理ネットワークのノード数の増加にともない、列挙される VNT 候補数が爆発的に増えるため、大規模ネットワークでは多大な計算時間が必要となる。そのため、物理トポロジーを縮約し、縮約した物理トポロジーで 2.4.1 項に示したアルゴリズムにしたがって多様なアトラクターを設計することを考える。具体的には、図 11 に示すように、物理トポロジーをクラスターに分割する。そして、クラスターをノードと見なすことによってノード数を削減し、その縮約されたトポロジーにおいて 2.4.1 項のアルゴリズムを適用する。以下に、本アルゴリズムの概要を示す。

Step 1. 物理トポロジーをクラスターに分割

Step 2. 下層のクラスター内において VNT 候補を作成

Step 3. 2.4.1 項のアルゴリズムにしたがい、上層において VNT 候補を作成

Step 4. クラスター間に光パスを設定

Step 1. では、まず物理トポロジーを c 個のクラスターに分割する。次に、分割した結果クラスター内に存在する頂点の数が c を超えているとき、頂点の数が c 以下になるまで再帰的にクラスターに分割する。こうして、上層が下層のノードを内含するクラスターから構成されるように、階層毎にクラスターを設定する。最後に、光ファイバーによってクラスター内のノード間は密に、クラスター間のノードは疎に接続されるよう、物理トポロジーにもとづいてクラスターを決定する。

Step 2. では、下層のクラスター内での VNT 候補を作成する。下層のクラスター内において、VNT 候補はフルメッシュ型、もしくはいくつかのハブノードをもつスター型で作成する。これは、クラスターは常にその内で発生するトラヒック変動に対応し、また故障が起きたとしても接続性を維持するためである。

Step 3. では、2.4.1 項のアルゴリズムにしたがって、ノード数 c の上層で様々な特性をもつ VNT 候補を設計する。

Step 4. では、クラスター間を接続するため、異なるクラスターに存在するノード間を光パスで接続する。つまり、上層におけるノード間の光パスを、下層において一致するクラスター間の光パスに対応づける。IP ルーターのポートを最大限利用できるように、下層に対応付けた光パスの数を決定する。クラスター間を接続するノードは、次数の低いノードを選択する。

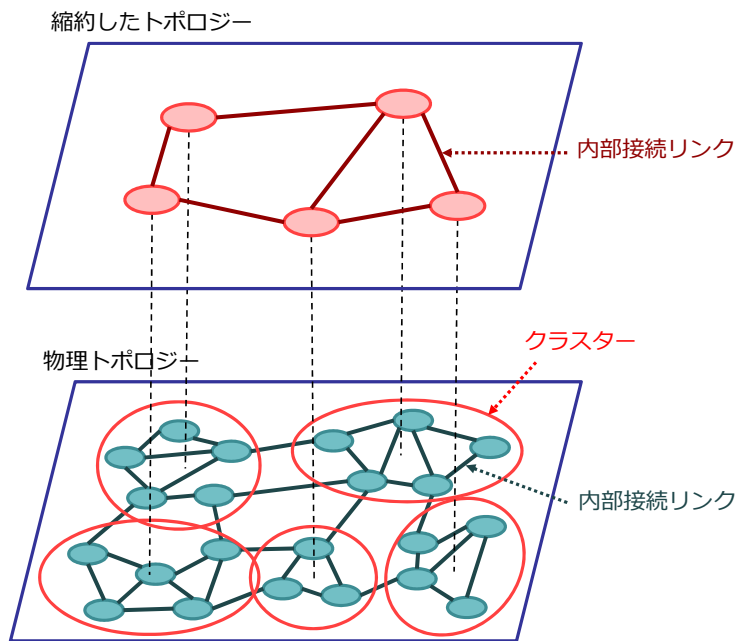


図 11: 物理トポロジーの縮約

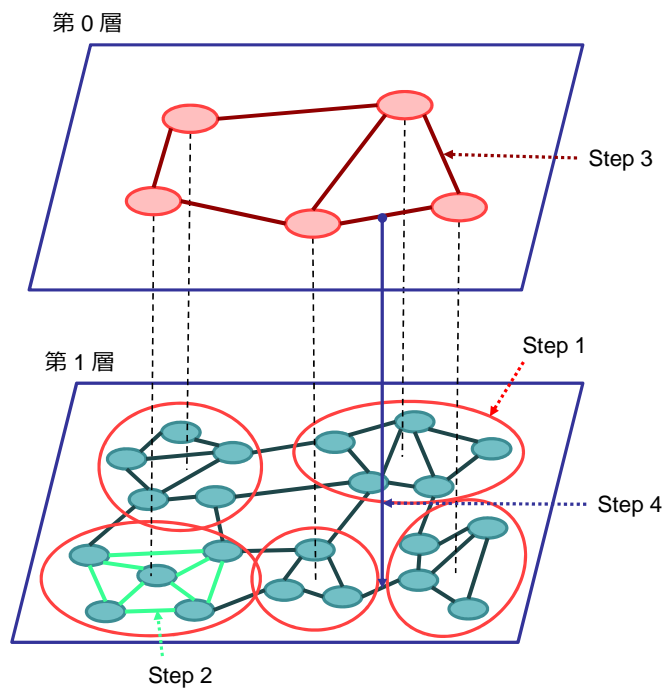


図 12: 階層化アトラクター設計手法の概要

3 アトラクター集合の動的更新手法の提案

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、これにもとづいて制御行列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。

3.1 アトラクター更新とアトラクター選択

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、アトラクター更新では周期を長くとることが可能である。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、システムの制御状態はアトラクターに引き付けられる。ただし、アトラクターを VNT としたときに必ずしも制御目標を達成するわけではなく、ゆらぎによって現在のトラヒック環境に適応した VNT を構築することで柔軟性が確保されている。つまり、現在のトラヒック環境に対して、適応的なアトラクターではなくとも、システムは良好な制御状態をとる可能性がある。したがって、オンライン計算で動作するアトラクター選択にもとづく VNT 制御と同じ周期でアトラクター更新を行う必要はなく、その周期よりも長い周期でアトラクター更新を実行することが可能である。

3.2 アトラクター更新に用いる環境情報

アトラクター更新では、環境情報として全対地間トラヒック量を表す行列 (以下、トラヒックマトリックス) を用いる。3.1 節で述べたように、アトラクターの更新周期は長くとることが可能であるため、本手法ではアトラクター更新をオフライン計算により行う。したがってトラヒックマトリックスを取得し、アトラクター更新に利用することが可能である。

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する。そのため、より短い時間間隔でのトラヒック変動や未知のトラヒックに対し、適応的に VNT を再構築することが可能である。しかし、アトラクター更新ではより短い更新周期よりも、現在のトラヒック環境により適応的なアトラクターを求めることが優先されるため、トラヒックマトリックスが使用可能であることが望ましい。そこで、アトラクター更新をオフライン計算で行うことにより、トラヒックマトリックスを取得可能であるものとする。3.3 節では、トラヒックマトリックス情報を用いて現在の環境に適したアトラクターを取捨選択し、制御行列を更新する方法を説明する。

3.3 アトラクター更新手法

本節では、アトラクター更新手法の具体的な手順を説明する。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。

- ϕ_i ($1 \leq i \leq N_{atr}$): i 番目のアトラクター
- η_s ($1 \leq s \leq N_{noise}$): シード s をもつノイズ
- c_i : ϕ_i をアトラクターとし、VNT 制御を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 (5) を用いて計算される \mathbf{W}

本手法では、オフライン計算にて行うアトラクター選択にもとづく VNT 制御を、式 (2) ではなく、式 (8) で実行する。アルゴリズムへの入力として、2つの情報を要求する。1つは現在の IP ネットワークのトラヒック需要を表すトラヒックマトリックス T 、もう1つは2.4節のアルゴリズムにしたがって生成された N_{atr} 個のアトラクターである。以下に示すアルゴリズムでは、まず現在のトラヒック環境に適したアトラクターを、制御成功までに必要な制御回数をもとに順位付けし、次に順位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。更新方法は3.3.2項で記述する。

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 (5) 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マトリックスと式 (8) にもとづいて VNT 制御を行い、Step 3.2. へ。

$$\frac{dx_k}{dt} = \alpha \cdot \left[\varsigma \left(\sum_k W_{kl}^{\{\phi_i\}} x_l \right) - x_k \right] + \eta_s \quad (8)$$

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. $i = N_{atr}$ 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 の大きいものから順にアトラクター ϕ_i を N_{set} 個選出し、それらをアトラクター集合 Φ_{rank} とする。Step 6. へ。

Step 6. Φ_{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。

3.3.1 環境不適応なアトラクターの抽出

現在のトラヒック環境に不適応なアトラクターを抽出し、適応的なアトラクターを組み入れる。なぜならば、現在のトラヒック環境に不適応なアトラクターがアトラクター集合に組み込まれていると、VNT の設定状態が安定するまでの制御回数が増大する可能性があるからである。環境不適応なアトラクターを抽出する方法として、オフライン計算により各アトラクターを 1 個ずつ用いて VNT 制御を行い、解発見までの時間を計測することによって、各アトラクターの環境適応度を計る。オフライン計算で各アトラクターの環境適応度を計るため、現在のトラヒックパターンを取得し、そのもとで各アトラクターを 1 個ずつ用いて VNT 制御を実施する。ここでは、解発見までの時間は VNT 制御の制御回数を指す。その理由として、VNT 制御の制御回数と、VNT の設定状態が安定するまでの実時間は比例関係にあるからである。

3.3.2 制御行列の更新

オフライン計算によって決定したアトラクター集合にもとづき、制御行列を更新する。その理由として、もし制御行列を更新しなければ、現在のアトラクター集合では対応できないトラヒックパターンが発生したとき、制御成功率が著しく減少するからである。ゆらぎによって、現在のアトラクター集合では対応できないトラヒックパターンに適応した VNT を発見する可能性はあるが、そのとき活性度が一時的に上昇する。活性度が上昇すると、アトラクター選択にもとづく VNT 制御は確定的なふるまいによって駆動され、よりアトラクターに引きつけられる。しかし、更新されていないアトラクター集合は現在のトラヒックパターンに不適応であるため、VNT の設定状態が現在のトラヒックパターンに不適応な状態となる。つまり、制御行列を更新せず、かつ現在のアトラクター集合では対応できないトラヒックパターンが発生したとき、ゆらぎによって一時的に良好な解を発見することはあるが、それを持続させることは困難である。したがって、あらゆるトラヒックパターンに対応するためには、制御行列の更新は必要不可欠である。

制御行列の具体的な更新方法を説明する。2.3.2 項の制御行列の構造で扱った \mathbf{W} の更新を行う。提案手法を用いて求めたアトラクター集合を $\{\phi_1, \dots, \phi_i, \dots, \phi_{N_{set}}\}$ とし、アトラクター ϕ_i に対応する遺伝子発現量を $\mathbf{x}^{(i)} (= (x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}))$ とする。ベクトル $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(N_{set})}$ を行とする行列 $\mathbf{X}^{\Phi_{rank}}$ を定義すると、 $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$ は式 (9) の通りに定義できる。

$$\mathbf{W}^{\Phi_{rank}} = \mathbf{X}^{\Phi_{rank}} + \mathbf{X}^{\Phi_{rank}} \quad (9)$$

$$\mathbf{W} \leftarrow \mathbf{W}^{\Phi_{rank}} \quad (10)$$

ただし、 $\mathbf{X}^{\Phi_{rank+}}$ は $\mathbf{X}^{\Phi_{rank}}$ の擬似逆行列である。こうして計算された $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$ は、現在のトラヒック環境に対してより適応的なアトラクターで構成されている。これを式 (10) にしたがって制御行列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可能とする。

表 1: トラヒックパターン

トラヒックパターン	偏差 σ
1	0.1
2	0.5
3	1.0
4	2.0

4 性能評価

本章では、3章で述べた方法を進める過程で必要な評価を 4.3.1 項で行い、現在の環境に適応的なアトラクターに更新した VNT 制御を行ったときの VNT 制御性能の評価を 4.3.2 項で行う。

4.1 評価環境

まず、評価に用いる物理トポロジーを説明する。対象とするネットワークとして、アメリカ合衆国の地理情報が考慮された USNET を用いる。USNET の物理トポロジーとノード番号を図 13 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 ルーター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 ルーター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。式 (4) の活性度のパラメーターを $\gamma = 1$ 、 $\sigma = 50$ 、 $\theta = 0.5$ とする。式 (8) の η_s 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 $\varsigma(z) = \tanh(\frac{\mu}{2}z)$ の μ は 20 とする。生成するアトラクターとして、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、2.4.2 項のアルゴリズム Step 4. 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。

取得するトラヒックパターンとしては、 $N(4.5, \sigma^2)$ の正規分布にしたがう乱数を各対地間トラヒック量に割り当てたものとする。4.3.2 項の評価では、 σ を変更することによってトラヒック変動が発生する状況を想定する。表 1 に、本評価で用いるトラヒックパターンを示す。

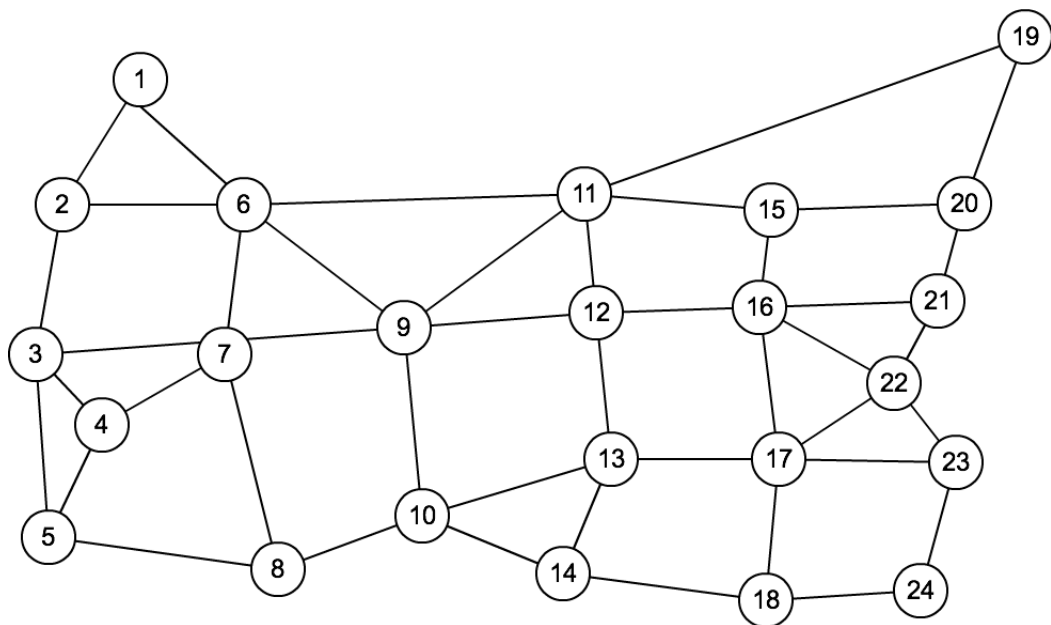


図 13: USNET

4.2 評価指標

評価指標として、最大リンク利用率、制御成功率、制御回数を用いる。

最大リンク利用率は、VNT を構成するすべ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。本評価では、最大リンク利用率を 0.5 以下とすることを目標としている。

制御成功率は、あるアトラクターを与えて VNT 制御を行ったときに、VNT の設定状態が収束した割合とする。活性度が 0.5 以上であるときは VNT の設定状態が安定していると判断し、VNT を 10 回再構築しても VNT の設定状態が安定していれば、VNT 制御に成功したとする。また、VNT の再構築を 300 回行って VNT の設定状態が安定しなかった場合は、VNT 制御に失敗したとする。制御成功率が高いほど、トラヒック変動に適応した VNT を構築することができる確率が高いことから、制御成功率は高いことが望ましい。

制御回数は、VNT の設定状態が収束するまでに VNT を再構築した回数とする。活性度が 0.5 以上であるときは VNT の設定状態が安定していると判断し、VNT を 10 回再構築しても VNT の設定状態が安定していれば、VNT の設定状態が収束したと判断し、VNT 制御

を打ち切る。このとき、制御回数は 10 回目に VNT の設定状態が安定していると判断された時点における制御回数とする。制御回数は最大 300 回とし、VNT の再構築を 300 回行っても VNT の設定状態が収束しなかった場合は VNT 制御を打ち切る。このとき、制御回数は 300 回とする。制御回数が小さいほど、トラヒック変動に適應した VNT をより速く構築することができることから、制御回数は小さいことが望ましい。

4.3 評価結果

4.3.1 アトラクター集合の更新

本項では、まず取得したトラヒックパターンを用いて、各アトラクターを 1 個ずつ用いて VNT 制御の性能評価を行い、現在のトラヒック環境に適應的なアトラクターを複数選び出す。次に、選んだアトラクターでアトラクター集合を構成し、式 (5) を用いて $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$ を計算しておく。以上の処理をオフライン計算で行う。最後に、オンライン計算で動作するアトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御行列 \mathbf{W} を更新する。3.3 節の定数は $N_{atr} = 14$ 、 $N_{noise} = 1000$ 、 $N_{set} = 7$ 、 $C_{th} = 30$ とする。つまり、生成するアトラクターは 14 個とし、ノイズ項のシードを 1000 回変更して VNT 制御を行った結果から、14 個のアトラクターのうち、制御回数 30 における制御成功率がより高い 7 個のアトラクターをアトラクター集合として選び出す。

まず、3.3 節における Step.1 から Step.4 を行う。ここでは、取得したトラヒックマトリックスにおいて、14 個のアトラクターを 1 個ずつ与えて VNT 制御を実行した結果、得られた VNT 制御の制御回数でアトラクターの環境適應度を比較評価する。図 14 に、各アトラクターを個別に与えて VNT 制御を行った結果、得られた制御回数の分布を示す。図 14 において、横軸は制御回数、縦軸は制御目標を達成していない VNT 制御数を相補累積度数関数 (以下、CCDF) で表している。つまり、制御目標を達成すればするほど CCDF は小さくなるので、CCDF は小さい方が望ましい。また、制御回数も小さいことが望ましいため、制御回数が小さい時点における CCDF が小さい分布が望ましい。図 14 を見ると、各アトラクターを個別に与えたときの VNT 制御の制御回数の分布に、それぞれが異なる傾向をもつことがわかる。アトラクター 14 やアトラクター 3 を与えて VNT 制御を実行した場合、VNT 制御の制御回数がおよそ 30 回でほとんどの VNT の設定状態が安定したのに対し、アトラクター 2 やアトラクター 4、アトラクター 12 を与えて VNT 制御を実行した場合、VNT の設定状態は始終不安定のまま VNT 制御を終えた。

次に、3.3 節における Step.5 を行う。ここでは、3.3 節における Step.1 から Step.4 までの行程を経て求めた制御回数の分布から、ある制御回数における制御成功率を比較することによって、アトラクター集合を構成するアトラクターを選択する。図 15 に、各アトラクター

候補を個別に与えて VNT 制御を行ったときの、制御回数 30 における最大リンク利用率の度数分布を示す。図 15 において、横軸は最大リンク利用率、縦軸は最大リンク利用率を 0.5 刻みとしたとき、アトラクター選択にもとづく VNT 制御を 30 回行った時点における最大リンク利用率が、その範囲に含まれる VNT 制御数を示す。図 15 を見ると、最大リンク利用率を閾値 0.5 以下に抑えられているアトラクターや、逆に抑えられていないアトラクターも観測でき、各アトラクターを VNT としたときの環境適応度がわかる。特に、アトラクター 14 やアトラクター 3 を与えて VNT 制御を実行した場合、制御回数 30 における最大リンク利用率はほとんど 0.5 以下に抑えられているのに対し、アトラクター 2 やアトラクター 4、アトラクター 12 を与えて VNT 制御を実行した場合、制御回数 30 における最大リンク利用率はほとんど 0.5 を上回っている。

これを定量的に比較評価するため、表 2 に各アトラクターを個別に与えて VNT 制御を実行したときの、制御回数 30 における制御成功率を示す。表 2 を見ると、アトラクター 3 やアトラクター 14 を与えて VNT 制御を実行した場合、制御回数 30 までにはおよそ 100% で VNT の設定状態が安定しているのに対し、アトラクター 4 やアトラクター 12 を与えて VNT 制御を実行した場合、制御回数 30 までに VNT の設定状態が安定する可能性はないことがわかる。本評価ではアトラクター集合を構成するアトラクター数は 7 としているため、アトラクター 14、3、10、8、7、13、9 の 7 つのアトラクターでアトラクター集合を構成する。そして、決定したアトラクター集合を用いて式 (5) を計算し、 $\mathbf{W}^{\Phi_{rank}}$ を求めておく。

最後に、3.3 節における Step.6 を行う。ここでは、3.3 節の Step.5 で求めた行列を、オンライン計算で動作する、アトラクター選択にもとづく VNT 制御における制御行列 \mathbf{W} へ代入する。

表 2: 30 回の VNT 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 (%)	32.0	0.0	98.5	0.0	63.6	52.2	89.2
アトラクター	8	9	10	11	12	13	14
制御成功率 (%)	93.6	81.8	94.5	0.1	0.0	88.9	99.5

4.3.2 VNT 制御性能の比較評価

3 つのアトラクター集合を用いて VNT 制御を行ったときの VNT の設定状態が安定するまでの制御回数を比較する。まず、アトラクター集合 1 はアトラクター 1、2、3、4、5、6、

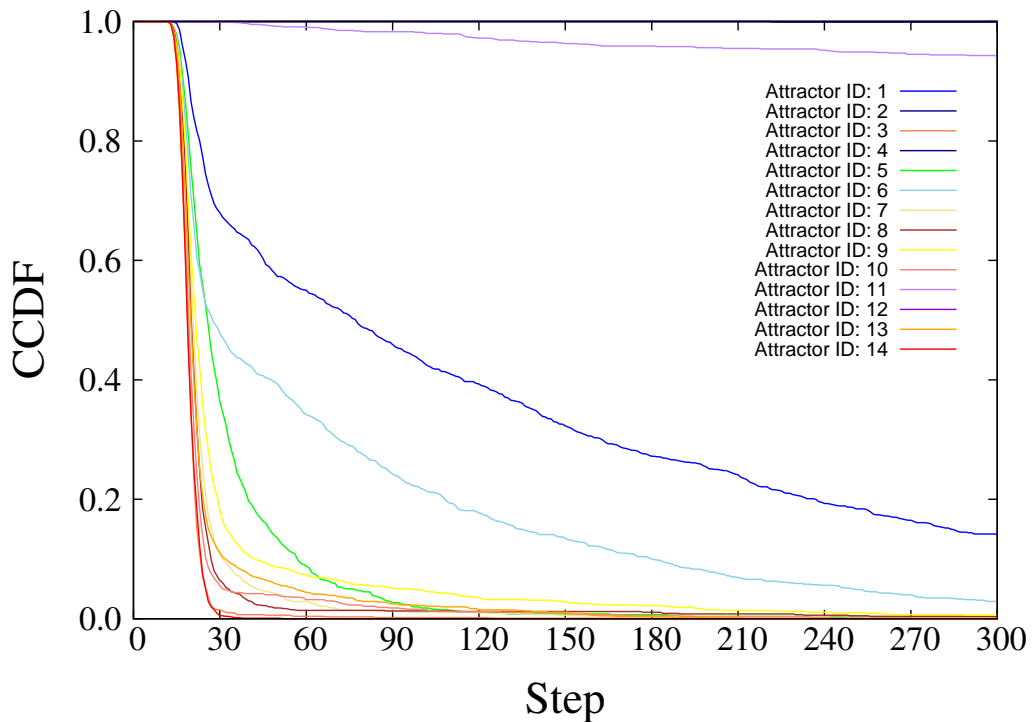


図 14: 各アトラクターにおける VNT 制御の制御回数の分布

7で構成されるものとする。これは、文献 [11] の手法を用いて一度に得られるアトラクター集合であり、提案手法以前で USNET を用いる場合はこれをアトラクター集合としている。これを比較評価に入れることによって、提案手法のもたらす効果を評価することが可能となる。次に、アトラクター集合 2 はアトラクター 1、8、3、9、5、6、7 で構成されるものとする。これは、3.3 節の Step 5. において、順位付けされたアトラクターを降順に選出するのではなく、現在のトラヒック環境に対する環境適応度が 0 に近いアトラクターは抽出し、ある程度環境適応度が高いアトラクターとランダムに交換したものとする。これを比較評価に入れることによって、トラヒック環境に不適応なアトラクターを抽出するだけでなく、より適応的なアトラクターを選出したときの効果を評価することが可能となる。最後に、アトラクター集合 3 はアトラクター 14、3、10、8、7、13、9 で構成されるものとする。これは、提案手法のアルゴリズムによって得られるアトラクター集合である。このアトラクター集合を用いて VNT 制御を行い、比較対象との差を評価する。

図 16 に、各アトラクター集合を用いて VNT 制御を実行したときの制御回数の分布を示す。トラヒックパターン 1 において各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 制御を行ったときの制御回数の分布を図 16 (a) に示す。図 16 (a) を見ると、制御回数 210 の時点でアトラクター集合 1 では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御成

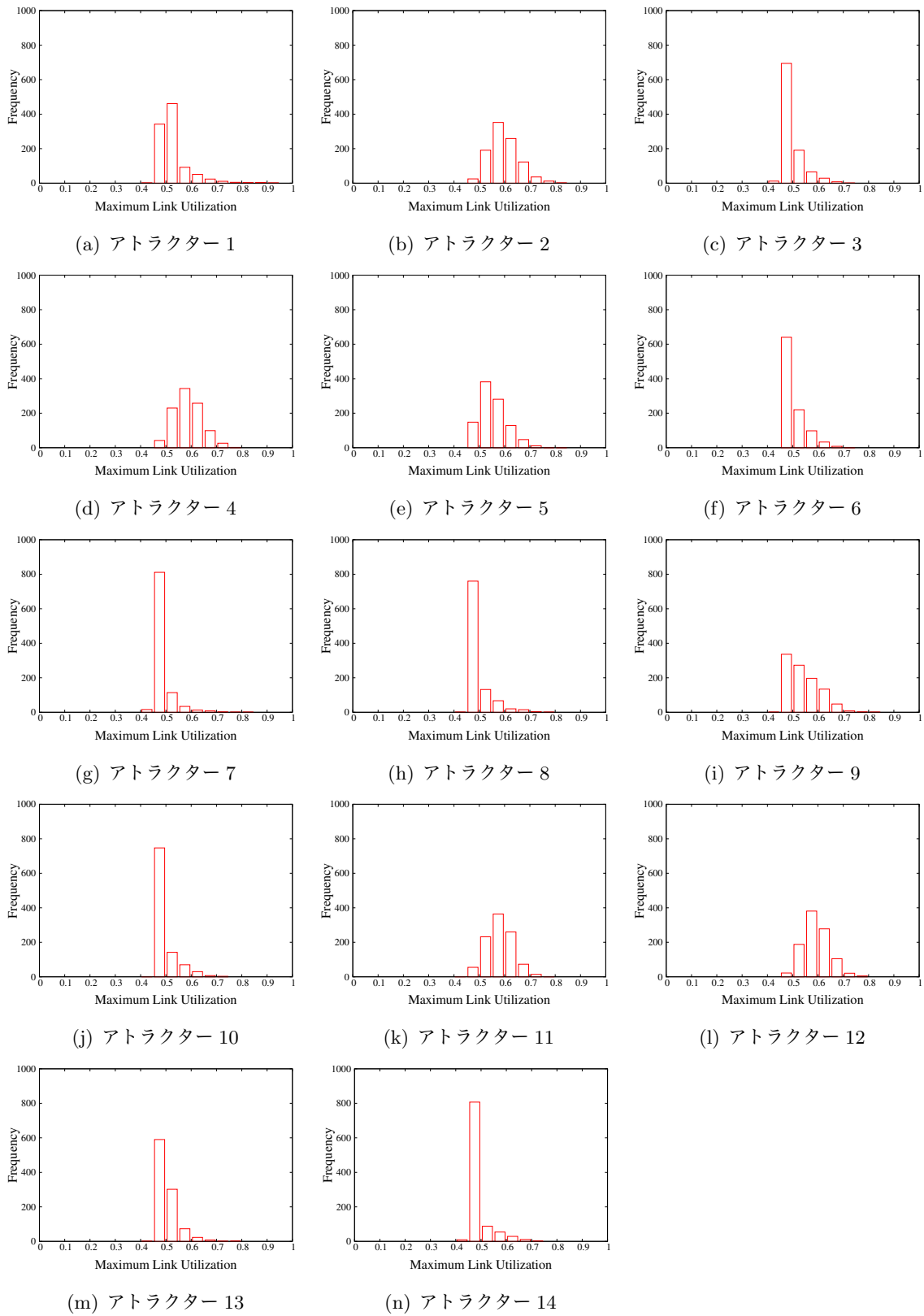


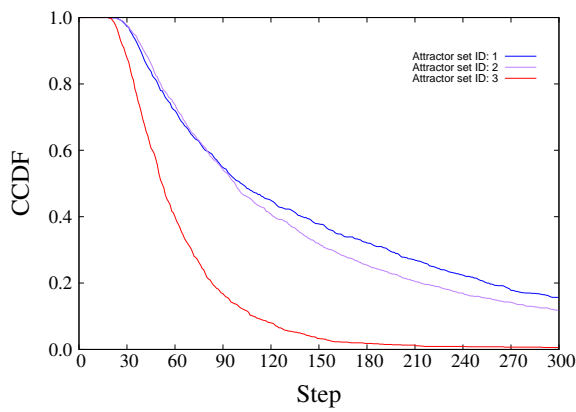
図 15: 30 回の VNT 制御後の最大リンク利用率

成功率がおよそ 70%、アトラクター集合 2 ではおよそ 80%、アトラクター集合 3 ではおよそ 100%であることがわかる。トラヒックパターン 1 では、アトラクター集合 3 に相当する提案手法は、アトラクター集合 1 に相当する従来の手法と比較して、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御成功率が最大約 40%改善された。また、アトラクター集合 3 はアトラクター集合 2 と比較したとしても、大きく改善されている。これにより、現在のトラヒック環境に不適応なアトラクターを抽出し、その後ランダムに適応的なアトラクターを組み入れるのではなく、3.3 節の Step 5. で行われるアトラクターのランク付けが、現在のトラヒック環境により適したアトラクターを組み入れるのに効果を発揮したことがわかる。

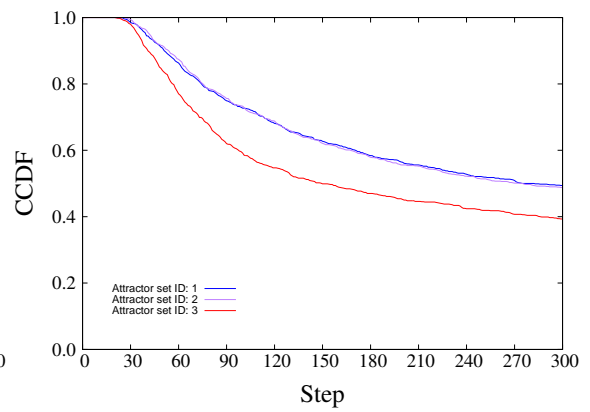
次に、トラヒックパターン 2 において各アトラクター集合を用いてアトラクター選択にもとづく VNT 制御を行ったときの制御回数の分布を図 16 (b) に示す。図 16 (b) を見ると、制御回数 300 の時点でアトラクター集合 1 では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御成功率がおよそ 50%、アトラクター集合 2 ではおよそ 50%、アトラクター集合 3 ではおよそ 60%であることがわかる。トラヒックパターン 2 では、トラヒックパターン 1 の場合と比べ、全体として大きく制御成功率が下がり、また提案手法のアトラクター集合と他のアトラクター集合を用いて VNT 制御を行ったときの制御成功率の差が小さくなった。その差はおよそ 10%を保つような結果が得られた。

次に、トラヒックパターン 3 において各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 制御を行ったときの制御回数の分布を図 16 (c) に示す。図 16 (c) を見ると、制御回数 300 の時点でアトラクター集合 1 では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御成功率がおよそ 40%、アトラクター集合 2 ではおよそ 40%、アトラクター集合 3 ではおよそ 60%であることがわかる。トラヒックパターン 3 では、トラヒックパターン 2 の場合と比べ、アトラクター集合 1 とアトラクター集合 2 を用いて VNT 制御を行ったときの制御成功率は減少したが、アトラクター集合 3 の制御成功率はほとんど減少せず、アトラクター集合 3 と他のアトラクター集合の制御成功率の差が大きくなった。

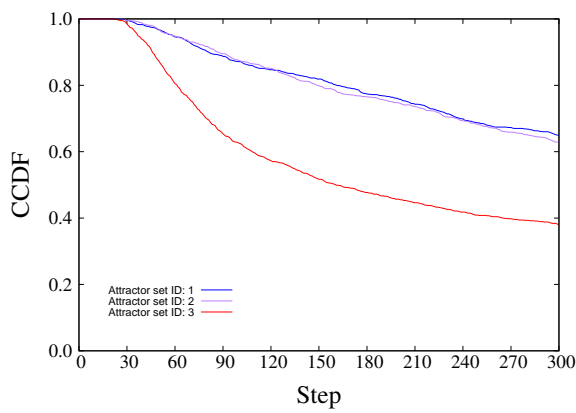
最後に、トラヒックパターン 4 において各アトラクター集合を用いてアトラクター選択にもとづく VNT 制御を行ったときの制御回数の分布を図 16 (d) に示す。図 16 (d) を見ると、制御回数 300 の時点でアトラクター集合 1 では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の制御成功率がおよそ 10%、アトラクター集合 2 ではおよそ 20%、アトラクター集合 3 ではおよそ 50%であることがわかる。トラヒックパターン 4 では、トラヒックパターン 3 の場合と比べ、全体的に制御成功率は減少した。しかし、トラヒック変動が発生する状況において、提案手法によって求められたアトラクター集合が、アトラクター選択にもとづく VNT 制御における制御成功率が一貫して高く、良い性能を示した。



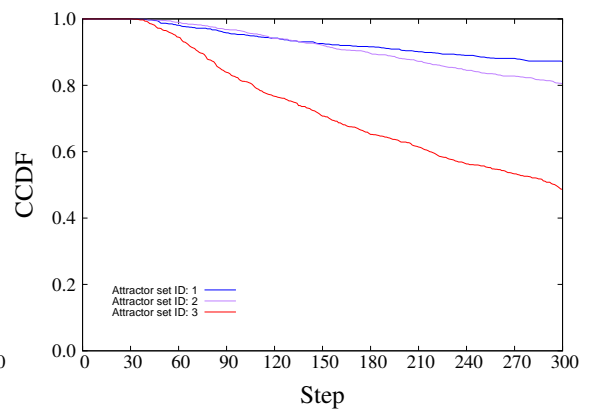
(a) トラヒックパターン 1



(b) トラヒックパターン 2



(c) トラヒックパターン 3



(d) トラヒックパターン 4

図 16: 各アトラクター集合を用いた VNT 制御の制御回数の分布

5 おわりに

本報告では、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、アトラクター集合の動的更新手法を提案した。提案した更新手法では、各アトラクター候補をアトラクターとし、取得したトラヒックマトリックスにおいてオフライン計算で VNT 制御を実行した結果、ある制御回数における制御成功率が大きい順に複数のアトラクターを選び出すことによってアトラクター集合を構成している。また、オフライン計算によって求めたアトラクター集合で、オンライン計算で動作するアトラクター選択にもとづく VNT 制御における制御行列を更新している。提案手法により更新したアトラクターを用いた、アトラクター選択にもとづく VNT 制御では、アトラクターを更新しない場合と比較すると、VNT 制御の制御性能が改善されることが明らかとなった。

本報告では、アトラクター集合として選ぶアトラクターを、主に VNT 制御の制御成功率の観点から選択した。今後は、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予定である。また、本報告ではトラヒックマトリックスを取得できると仮定したが、取得できない場合における解決策を考える必要がある。

謝辞

本報告を終えるにあたり、特別研究全般に関して広く御指導、御教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深謝いたします。また、多くの示唆に富んだ議論を通して、本報告の方向性を示してくださった大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授に厚く御礼申し上げます。また、適切な御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の小泉佑揮助教、大阪大学大学院情報科学研究科の大下裕一助教、大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に感謝いたします。加えて、日頃より親身に相談に乗って頂き、様々な助言を頂きました大場斗士彦氏、井上昴輝氏、四條能伸氏、宮川裕考氏に心より感謝いたします。特に大場斗士彦氏には、本報告を進め始めた初期の頃より、様々な面で協力を惜しまず、熱心にご指導を賜りました。心より感謝の意と御礼を申し上げます。最後に、本報告の作成にあたり様々な支えを頂きました村田研究室の皆様、基礎工学部情報科学科の友人、家族に厚く感謝の意を表して謝辞と致します。

参考文献

- [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.