

特別研究報告

題目

WDM ネットワークにおける自己組織型仮想網制御の アトラクター決定手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

大場 斗士彦

平成 25 年 2 月 12 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

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決定手法の提案と評価

大場 斗士彦

内容梗概

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であるが、既存手法では、どのような VNT 候補を構築するべきかが考慮されていない。どのような VNT 候補を構築するべきかを明らかにすることで、VNT 制御のトラフィック変動に対する適応性を向上することができる。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、どのような VNT 候補を構築するべきかの指針を提案する。提案手法では、ヒューリスティックな手法である I-MLTDA により VNT 候補を算出し、平均ホップ長の観点から VNT 候補を絞り込む。さらに、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ため、ランダムに構成された VNT 候補を算出し、それらを合わせて VNT 候補を決定する。計算機シミュレーションによる評価では、決定した VNT 候補を初期アトラクターとして与え、VNT 制御を行う。評価の結果、平均ホップ長の観点から選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を 50% 加えたものを初期アトラクターとすることで、全てランダムに算出した VNT 候補を初期アトラクターとする場合よりも、制御成功率が最大約 20% 改善されることがわかった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing) 、VNT (Virtual Network Topology) 制御、IP (Internet Protocol) 、アトラクター選択

目次

1	はじめに	6
2	IP over WDM ネットワーク	9
2.1	WDM 技術	9
2.2	仮想網制御	10
3	アトラクター選択にもとづく自己組織型仮想網制御手法	14
3.1	アトラクター選択モデル	14
3.2	自己組織型仮想網制御手法	15
4	アトラクター決定手法	19
4.1	WDM ネットワークにおける制約	19
4.2	予備仮想網候補の算出	19
4.3	仮想網候補の決定手法	20
5	性能評価	22
5.1	仮想網候補の決定	22
5.2	仮想網制御性能の比較評価	22
6	まとめと今後の課題	41
	謝辞	42
	参考文献	43

目 次

1	WDM 伝送システム	9
2	IP over WDM : ポイントポイント間通信	10
3	物理トポロジー	11
4	光パスの設定例	11
5	仮想網 (VNT)	12
6	IP over WDM ネットワーク	12
7	アトラクター選択の VNT 制御への適用	16
8	アトラクター選択にもとづく VNT 制御のフローチャート	18
9	最大リンク利用率 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 1)	25
10	最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 1)	25
11	最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 1)	26
12	最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 1)	26
13	最大リンク利用率 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 1)	27
14	制御回数 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 1)	28
15	制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 1)	29
16	制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 1)	29
17	制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 1)	30
18	制御回数 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 1)	30
19	制御回数の分布 (トラヒックパターン 1)	32
20	最大リンク利用率 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 2)	34
21	最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 2)	34

22	最大リンク利用率：ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 2)	35
23	最大リンク利用率：ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 2)	35
24	最大リンク利用率：VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 2)	36
25	制御回数：VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 2)	37
26	制御回数：ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 2)	37
27	制御回数：ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 2)	38
28	制御回数：ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 2)	38
29	制御回数：VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 2)	39
30	制御回数の分布 (トラヒックパターン 2)	40

表 目 次

1	制御成功率 (トラヒックパターン 1)	27
2	平均制御回数 (トラヒックパターン 1)	32
3	制御成功率 (トラヒックパターン 2)	33
4	平均制御回数 (トラヒックパターン 2)	40

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) トラヒックを収容する IP over WDM ネットワークが広く検討されている [1-17]。

トラヒック需要の変化に適応し、IP トラヒックを効率的に VNT 上に収容するためのアプローチとして、2つの方式が考えられている。1つは、ノード間のトラヒック需要を長期にわたって計測することで算出し、それらのトラヒック需要を収容する VNT を静的に構築するオフライン型 VNT 制御である [8-12]。たとえば文献 [9] では、ノード間のトラヒック需要を長期にわたって計測することで算出し、光パスの利用率の最小化、すなわち VNT のリンク利用率の最小化を目指した VNT 制御手法が提案されている。一方、定期的に VNT 上の通信品質を計測し、トラヒック変動に応じて通信品質が劣化した際に、VNT を動的に再構成するオンライン型の VNT 制御が検討されている [13-17]。文献 [13] では、一日のトラヒ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ヒック需要変化に適応するための動的な 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ヒ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おり、文献 [14, 15] では、短時間のリンク上のトラヒック量を短時間計測し、トラヒック需要を推定して VNT を再構成するトラヒックエンジニアリング手法が提案されている。

また近年のインターネットでは、P2P ネットワーク、VoIP、動画配信サービスなどの新たなサービスが登場し、ネットワーク上でのトラヒック需要の変化が大きくなることが指摘されている [18, 19]。文献 [18] では、オーバーレイネットワークと既存のトラヒックエンジニアリングとの相互作用によって、トラヒック需要などのネットワークの状態が大きくかつ不規則に変化することが示されている。トラヒック需要の変化が急激である場合、長期的な計測によりトラヒックマトリクスを取得し VNT を設計する手法では、トラヒック需要の変化に追従して VNT を再構築することはできない。したがって、より短い時間オーダーでのトラヒック変動や、未知のトラヒックに対して適応的に VNT を再構成する VNT 制御手法が必要である。

集中型の制御アプローチ [8-17] では、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。

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收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 [20]。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、集中計算型の 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 [20]、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 [21]。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 制御手法を提案してきた [22]。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 [20-22] 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 候補を構築する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。また、構築する VNT 候補をさらに有用なものとするため、VNT 候補を構築する際には 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する必要がある。これらの制約を考慮することで、より環境に適した VNT 候補を構築することができる。

本報告では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御においてどのような VNT 候補を構築するべきかの指針を提案する。どのような VNT 候補を構築するべきかを明らかにすることで、よりトラフィック変動に対する適応性が向上し、制御に要する時間を削減することができる。まず、従来の手法では、VNT 候補をすべてランダムに算出して VNT 候補を決

定している。この場合、アトラクター選択により探索される解に多様性があるが、解の探索にどの程度の時間を要するかが保証されない。そこで、ヒューリスティックな手法である I-MLTDA [23] により VNT 候補を算出し、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 VNT 候補を決定することを考える。この場合、すべての VNT 候補が平均ホップ長を考慮して選択されているため、アトラクター選択により探索される解は多様性に乏しく、一定のトラヒックパターンに対しては速くアトラクターに収束できるが、それ以外のトラヒックパターンに対してはゆらぎによる探索を続けても適したアトラクターを発見することができる可能性が低い。そこで、提案手法では、I-MLTDA により VNT 候補を算出し、平均ホップ長の観点から VNT 候補を絞り込む。さらに、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ため、ランダムに構成された VNT 候補を算出し、それらを合わせて VNT 候補を決定する。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章では、本報告で対象とする IP over WDM ネットワークについて詳しく説明する。次に 3 章では、従来のアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法について詳細に述べる。4 章では、アトラクター選択にもとづく VNT 制御における VNT 候補の決定手法を述べる。5 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 6 章で本報告のまとめと今度の課題について述べる。

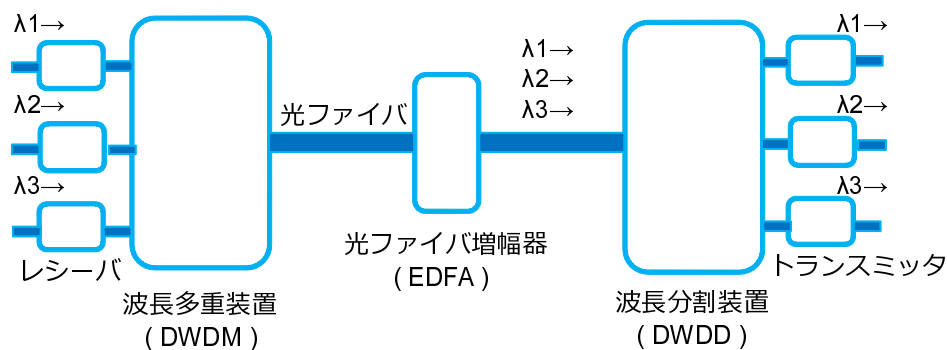


図 1: WDM 伝送システム

2 IP over WDM ネットワーク

本章では、本報告で対象とする光基盤ネットワークのモデルである IP over WDM ネットワークを説明する。

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。WDM 技術を用いた伝送システムを図 1 に示す。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播し、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割装置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。

IP over WDM ネットワークは、インターネットトラヒックの伝送に WDM 技術を利用したものである。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 トラヒックをルータが扱うことになり、ルータにお

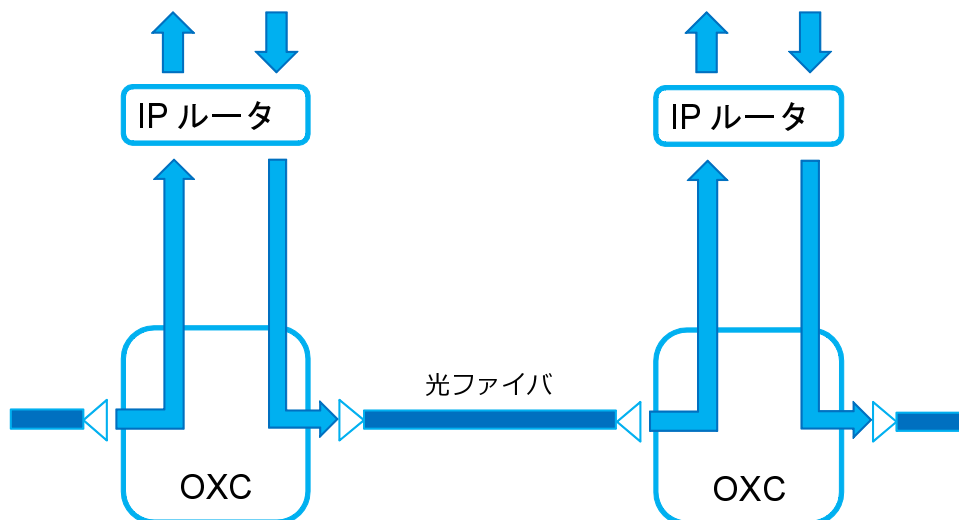


図 2: IP over WDM : ポイントポイント間通信

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 ルーター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ー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。

2.2 仮想網制御

たとえば、図 3 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。このとき、図 4 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 4 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 5 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仮想網 (VNT) と呼ぶ。また図 5 に対して、図 3 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。

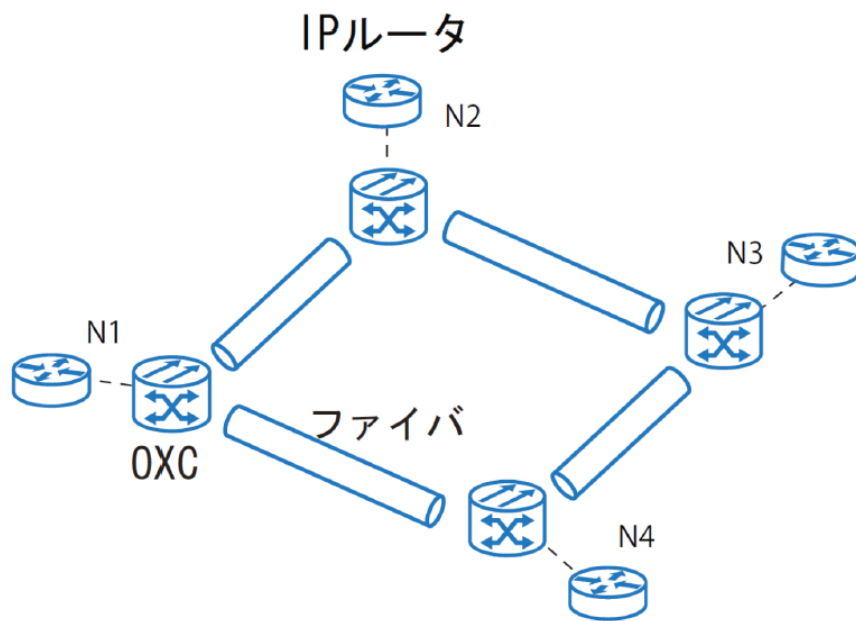


図 3: 物理トポロジー

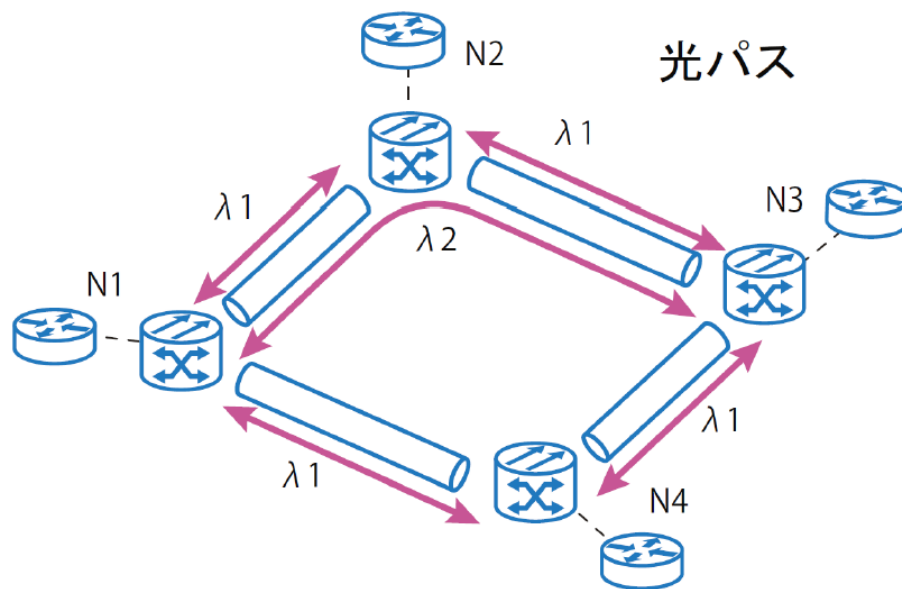


図 4: 光パスの設定例

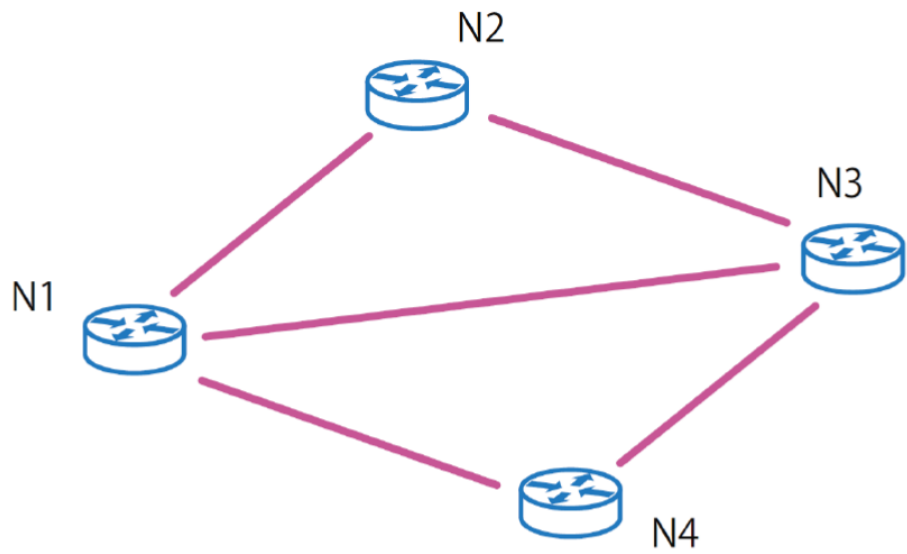


図 5: 仮想網 (VNT)

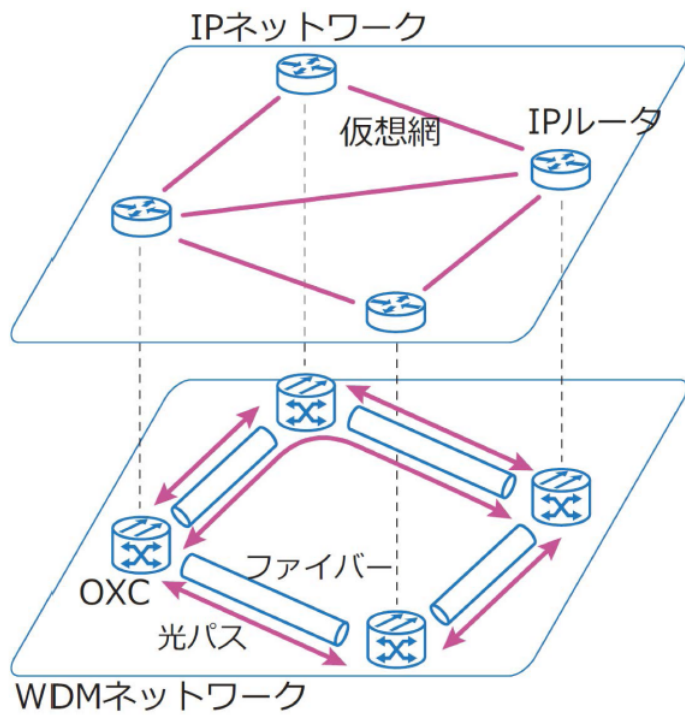


図 6: IP over WDM ネットワーク

本報告で想定する IP over WDM ネットワークを図 6 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 が構築される。IP ルータ間にはトラヒック需要があり、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ヒックが転送される。トラヒ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ヒック需要に適した VNT を構築する必要がある。なお本報告では、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。

3 アトラクター選択にもとづく自己組織型仮想網制御手法

本章では、文献 [20–22] 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。

3.1 アトラクター選択モデル

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。アトラクターを持つ制御構造とゆらぎは、システムが円滑に動いているかどうかを示す指標である活性度のフィードバックによってコントロールされる。このように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。アトラクター選択で駆動するシステムの振る舞いは、式 (1) で表される。

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

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 は遺伝子の数)。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 で制御される。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 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 $f(\mathbf{x})$ で定義されるアトラクターに強く引きつけられる。一方、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の状態のダイナミクスにおけるゆらぎの影響の大小を制御することで、環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現している。

3.1.1 遺伝子

遺伝子 x_i のダイナミクスは式 (2) で表される。

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

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、遺伝子間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。

3.1.2 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。

3.2 自己組織型仮想網制御手法

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。

3.2.1 遺伝子発現にもとづく光パスの制御

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 0.5 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。

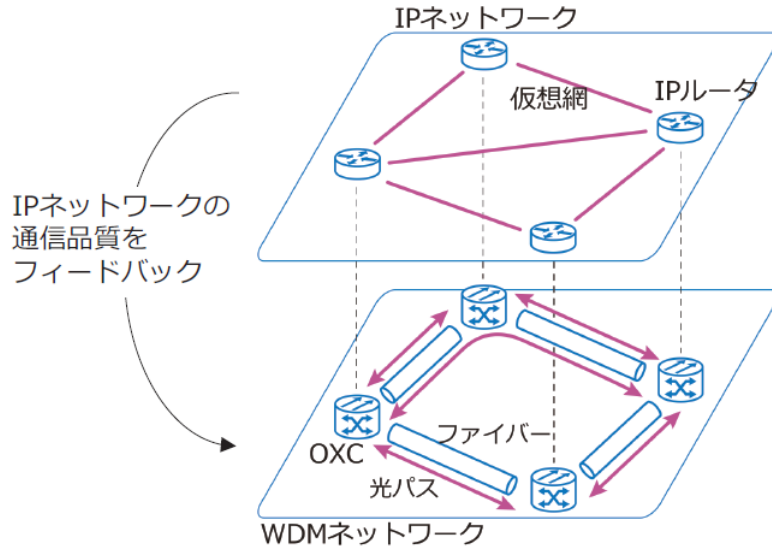


図 7: アトラクター選択の VNT 制御への適用

$$l_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq 0.5 \\ 0 & x_i < 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

3.2.2 制御の活性度

IP ネットワークのコンディションを表す指標として、文献 [9] をはじめとして多くの既存研究で仮想網制御の性能指標として使用されている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 (4) のように定義する。

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

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。最大リンク利用率 u_{max} が θ より大きい場合は、IP ネットワークの性能が悪いとみなし、 α を急激に 0 に近づけ、ゆらぎにより VNT 制御は新たなアトラクターを探索する。一方、 u_{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。

3.2.3 制御行列

アトラクター選択によって選択されるアトラクターは制御行列により決定される。制御行列は複数の VNT 候補をアトラクターとして記憶するものである。構築する VNT を g_k とし、 g_k に対応する遺伝子の値の組を $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ 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。

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

3.2.4 動作概要

アトラクター選択にもとづく VNT 制御の流れを図 8 に示す。すなわち、以下の手順で VNT を制御する。以降の説明では、文献 [20, 21] で述べられている 遺伝子を状態変数とする。

1. 定期的に IP ネットワークのリンク利用率を計測する。
2. 計測したリンク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 ネットワークが円滑に動いているかどうかを判断する。
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決定項による制御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デマンドの変化によりリンク利用率が変化する。
6. 再びリンク利用率を計測し、制御を行う。

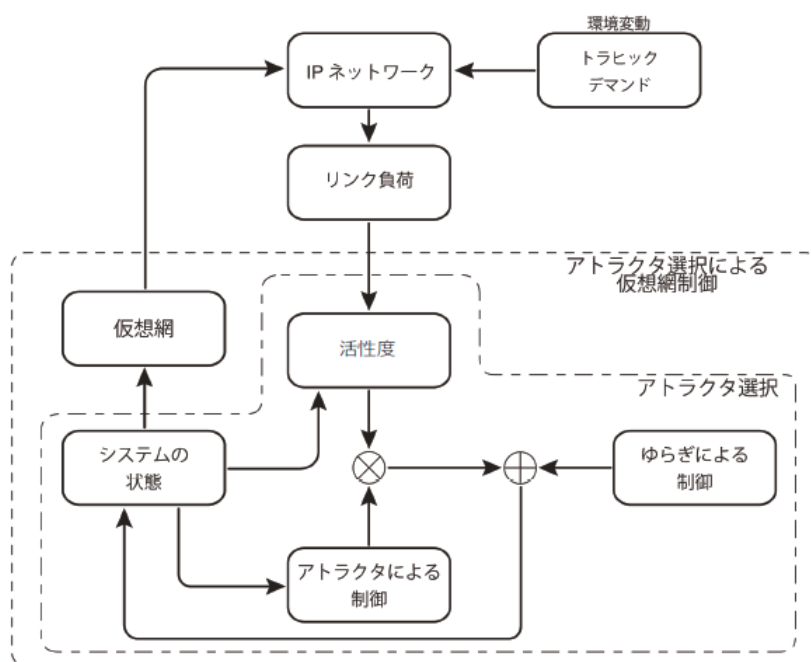


図 8: アトラクター選択にもとづく VNT 制御のフローチャート

4 アトラクター決定手法

本章では、本報告の提案手法である、アトラクターとなる VNT 候補の決定手法を説明する。

4.1 WDM ネットワークにおける制約

文献 [20–22] で用いられているアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、WDM ネットワークにおける制約に関して、ポート数制約のみが考慮されているが、提案手法では VNT 候補決定時に波長多重数制約も考慮している。波長多重数制約も考慮に入れることで、より環境に適した VNT 候補を算出することができる。

4.1.1 ポート数制約

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 をノード s からノード d への光パスとする。 $x_i \geq 0.5$ の場合に、ノード s からノード d への光パスを設定する。ただし、ノード s のトランスミッター、ノード d のレシーバーに余りがないと光パスを設定することはできない。

4.1.2 波長多重数制約

光ファイバ上の波長数が光パス数を制約するものとする。光パス l_i をノード s からノード d への光パスとする。 $x_i \geq 0.5$ の場合に、ノード s からノード d への光パスを設定する。ただし、ノード s からノード d への最短経路を構成するすべての光ファイバの波長に余りがないと光パスを設定することはできない。

4.2 予備仮想網候補の算出

提案手法では、まず 4.1 節で述べた制約を考慮した I-MLTDA を適用することで予備 VNT 候補を複数個算出する。

I-MLTDA については以下で述べる。

I-MLTDA: Increasing Multi-hop Logical Topology Design Algorithm

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 間のトラフィックデマンド

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フィック量 $\Delta_{sd} \times (H_{sd} - 1)$ 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。

4.3 仮想網候補の決定手法

次に、4.2 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。ランダムに算出した VNT 候補を加えない場合は、予備 VNT 候補を絞り込んだものを VNT 候補とする。ランダムに算出した VNT 候補を加える場合は、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、すべての VNT 候補をランダムに算出して VNT 候補を決定する。

具体的には、以下のように VNT 候補を決定する。

- I-MLTDA により算出された予備 VNT 候補の中から平均ホップ長が小さい順に予備 VNT 候補を選択して VNT 候補とする。
- I-MLTDA により算出された予備 VNT 候補の中から平均ホップ長が小さい順に選択した VNT 候補と、ランダムに算出した VNT 候補を合わせる。
 - 平均ホップ長が小さい順に選択した VNT 候補が 20%, ランダムに算出した VNT 候補が 80%
 - 平均ホップ長が小さい順に選択した VNT 候補が 50%, ランダムに算出した VNT 候補が 50%
 - 平均ホップ長が小さい順に選択した VNT 候補が 80%, ランダムに算出した VNT 候補が 20%

- すべての VNT 候補をランダムに算出する。

また、ランダムな VNT 候補の算出方法を以下で述べる。この方法は、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だけに限り設定する。 Step. 2 へ。

5 性能評価

本章では、4.3節で述べたそれぞれの方法で VNT 候補を決定し、それぞれ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 制御を行ったときの性能を比較評価する。

5.1 仮想網候補の決定

4.2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次数に 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口 [24]、 G は定数である。本報告では、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、4.3 節で述べたそれぞれの方法で 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。

5.2 仮想網制御性能の比較評価

5.2.1 評価環境

5.1 節で述べたように決定したそれぞれの 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 制御の性能を計算機シミュレーションにより比較評価する。

物理トポロジーは、5.1 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 5.1 節と同様である。また、式 (4) の活性度の定数を $\gamma=1$ 、 $\delta=50$ 、

$\theta=0.5$ とし、式 (2) 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としては、以下の 2 つの場合を考え、VNT 候補の決定方法によるそれぞれのトラフィック需要に対する適応性を比較評価する。

- 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 (トラフィックパターン 1)
基準となるトラフィックデマンドマトリクス各要素をランダムに 1.8~2.0 倍したものを 2000 パターン使用する。
- トラフィック需要が急激に変化した場合を想定したトラフィックパターン (トラフィックパターン 2)
基準となるトラフィックデマンドマトリクス各要素をランダムに 1.0~4.0 倍し、さらに各要素をランダムに入れ替えたものを 2000 パターン使用する。

5.2.2 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。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、複数のトラフィックパターンの中で 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 400 回行っても 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、トラフィ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、制御回数は初めに 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 400 回とし、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 制御を打ち切る。このとき、制御回数は 400

回とする。制御回数が小さいほど、トラフィック変動に適応した 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。

5.2.3 評価結果

まず、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を与えた場合の評価結果について説明する。

VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの 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 制御を行ったときの最大リンク利用率のヒストグラムをそれぞれ図 9～図 13 に示す。各図において、横軸は最大リンク利用率、縦軸は最大リンク利用率を 0.05 刻みとしたとき、アトラクター選択にもとづく VNT 制御を行ったときに最大リンク利用率がその範囲に抑えられたトラフィックパターン数を示す。図 9～図 13 を見ると、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合は、大半のトラフィックパターンに対し最大リンク利用率を 0.3～0.5 程度まで抑えられているが、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合は、最大リンク利用率を 0.4～0.5 程度までしか抑えられていないことがわかる。しかし、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ので問題はない。一方、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合は、最大リンク利用率を 0.5 以下に抑えられておらず、0.7～1.0 程度になるトラフィックパターン数が多いことがわかる。

次に、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの 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 制御を行ったときの制御成功率を表 1 に示す。表 1 を見ると、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合は、ランダムに算出した VNT 候補を加える割合により制御成功率に差はほぼ見られないが、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合と比べ、制御成功率が約 3% 改善されており、また VNT 候補をすべてランダムに算出した場合と比べ、制御成功率が約 20% 改善されていることがわかる。

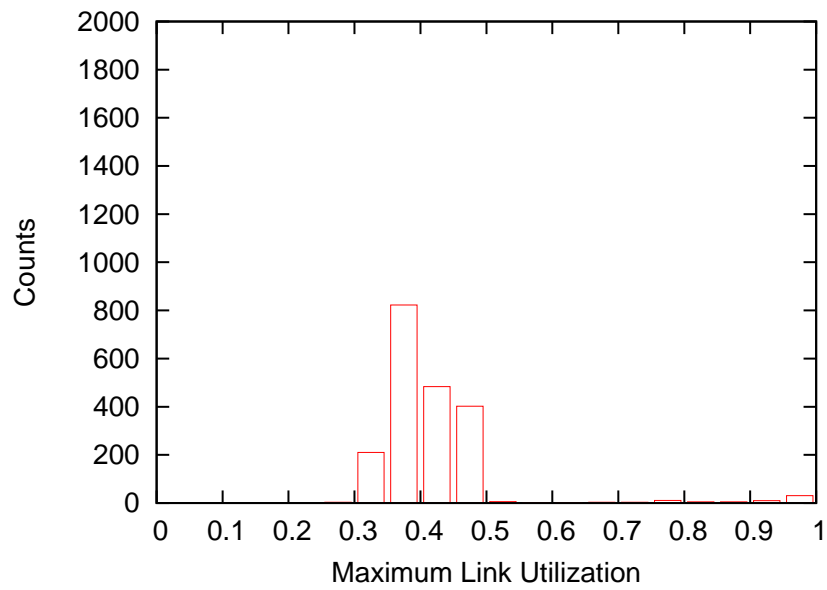


図 9: 最大リンク利用率 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラフィックパターン 1)

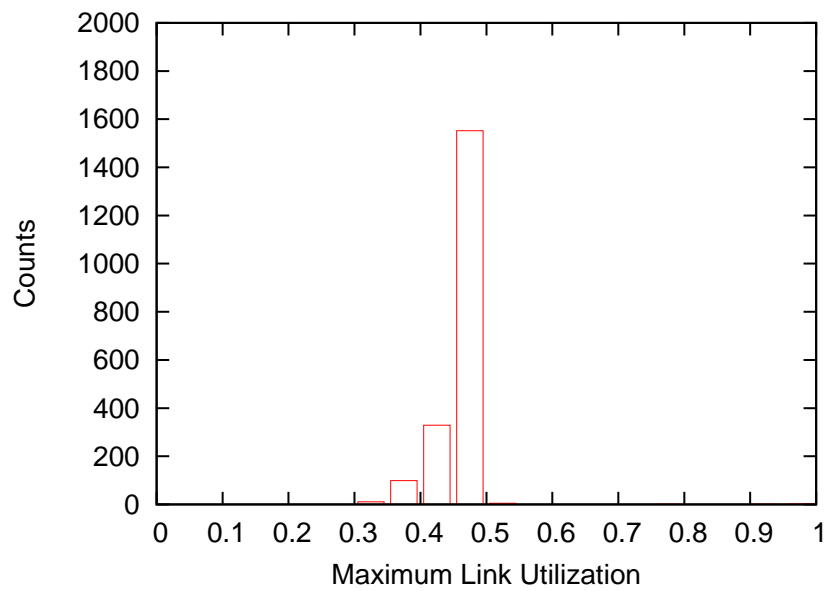


図 10: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラフィックパターン 1)

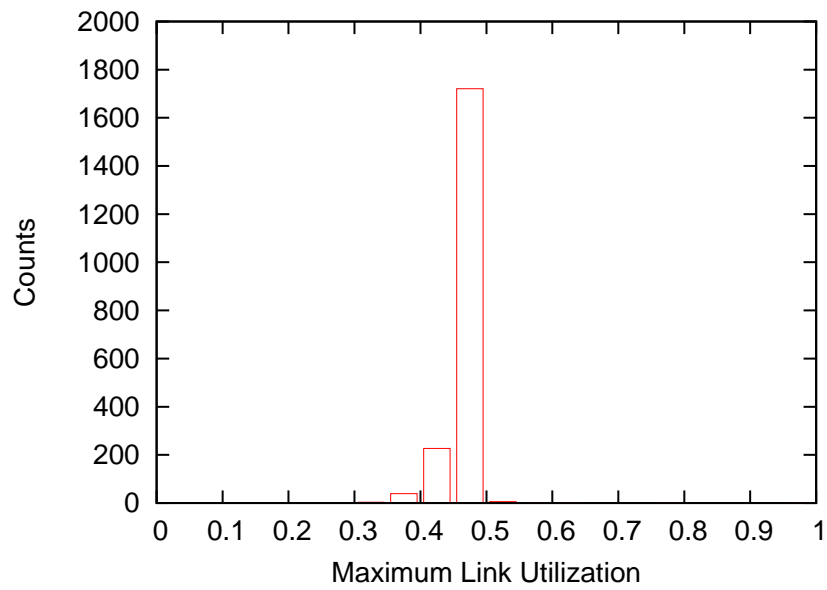


図 11: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラフィックパターン 1)

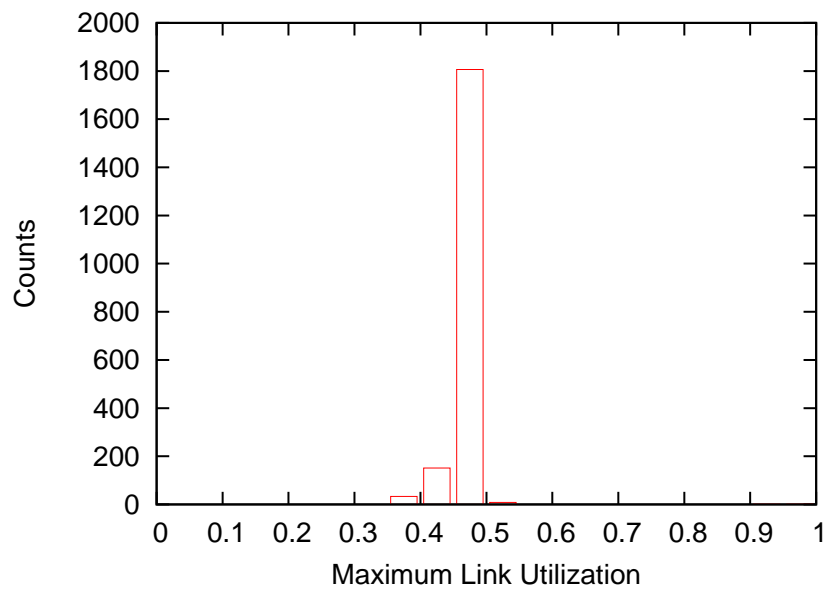


図 12: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラフィックパターン 1)

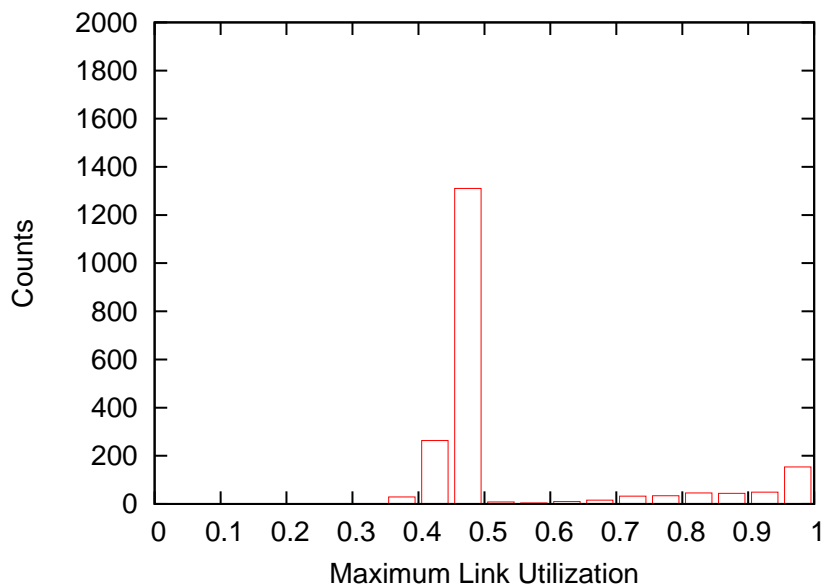


図 13: 最大リンク利用率 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラフィックパターン 1)

表 1: 制御成功率 (トラフィックパターン 1)

VNT 候補決定方法	制御成功率 (%)
平均ホップ長順に選択した VNT 候補 100%	96.05
ホップ長順に選択した VNT 候補 80% ランダムに算出した VNT 候補 20%	99.55
ホップ長順に選択した VNT 候補 50% ランダムに算出した VNT 候補 50%	99.5
ホップ長順に選択した VNT 候補 20% ランダムに算出した VNT 候補 80%	99.5
ランダムに算出した VNT 候補 100%	79.6

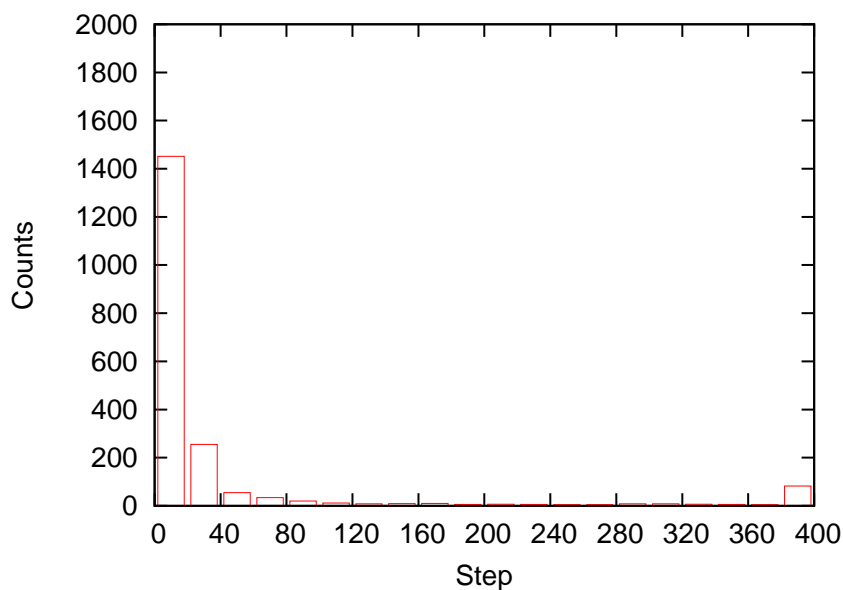


図 14: 制御回数 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 1)

次に、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの 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 制御を行ったときの制御回数のヒストグラムをそれぞれ図 14～図 18 に示す。各図において、横軸は制御回数、縦軸は制御回数を 20 回刻みとしたとき、アトラクター選択にもとづく VNT 制御を行ったときに制御回数とその範囲に抑えられたトラヒックパターン数を示す。図 14～図 18 を見ると、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラヒックパターン数が 1400 パターン以上と多いが、制御回数が 400 回近いトラヒックパターンもあることがわかる。一方、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラヒックパターン数は 1400 パターンを下回ってはいるが、制御回数が 400 回近いトラヒックパターン数はほとんどないことがわかる。また、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラヒックパターン数が 1000 パターンを下回り、制御回数が 400 回近いトラヒックパターン数が多いことがわかる。

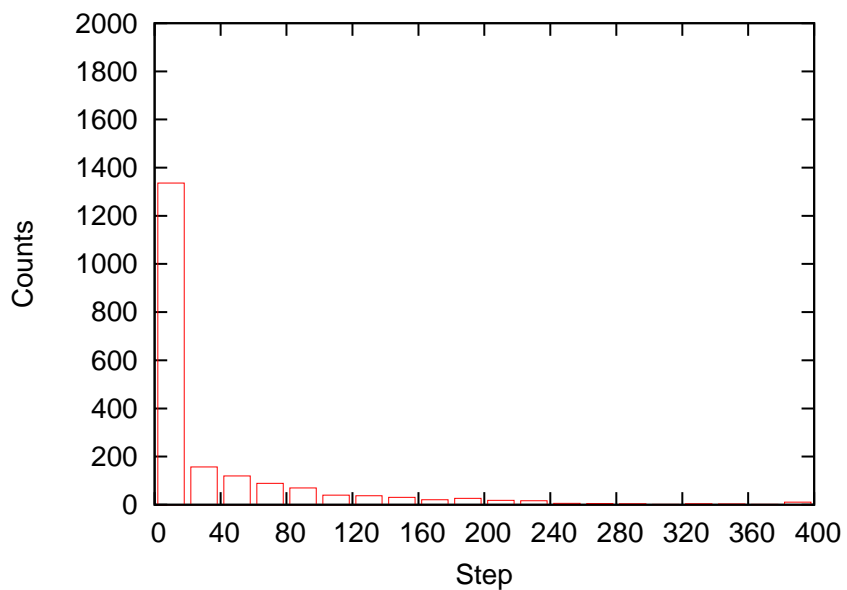


図 15: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 1)

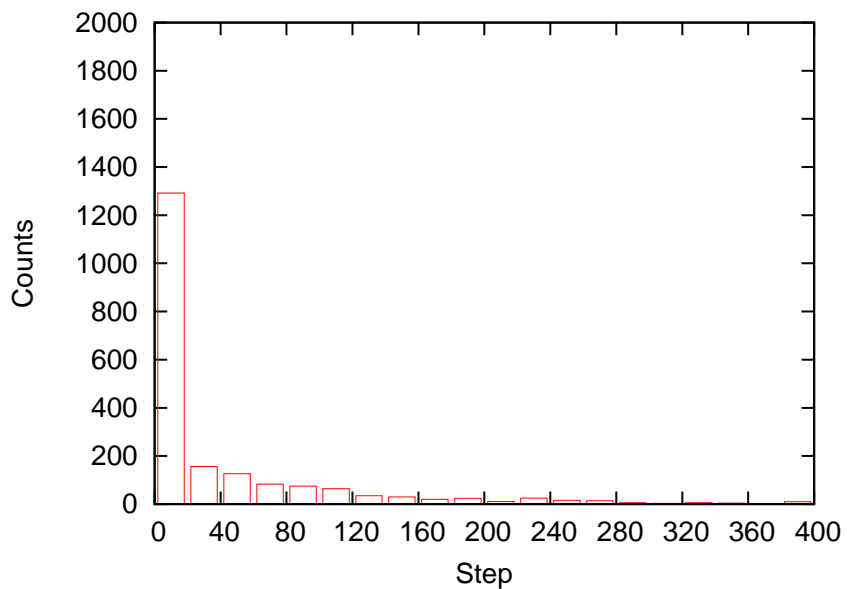


図 16: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 1)

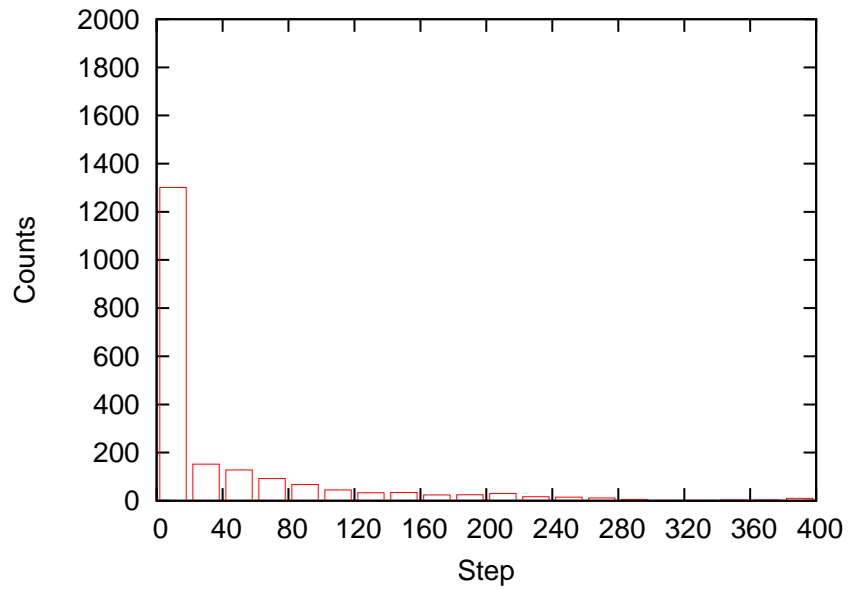


図 17: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 1)

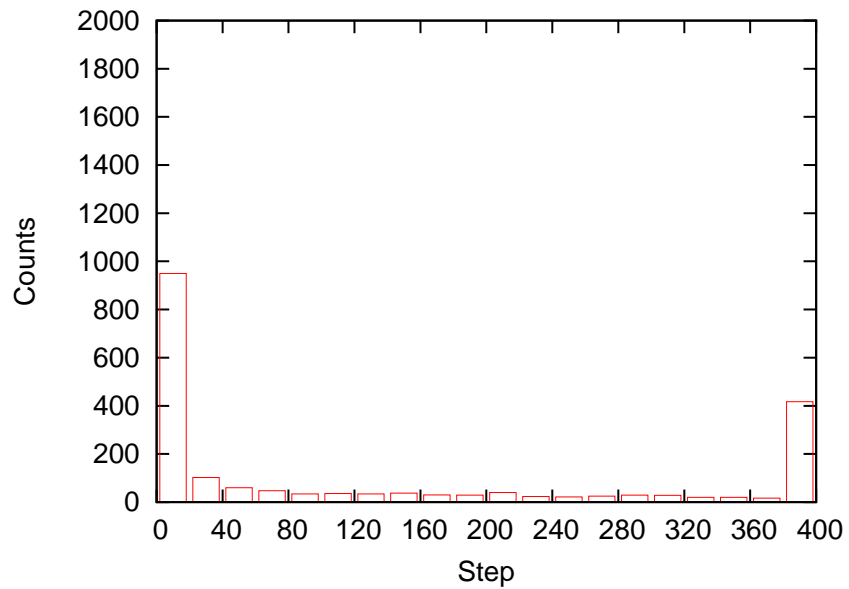


図 18: 制御回数 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 1)

次に、VNT 候補の決定方法によるの制御回数の分布を図 19 に示す。図 19 において、横軸は制御回数、縦軸は制御回数が横軸の値以上である確率を示し、両軸ともに自然対数をとった値を示している。すなわち、縦軸の確率が高いほど、制御回数がより多いトラヒックパターン数が多いため、横軸の制御回数が増えるほど、縦軸の確率は小さくなることが望ましい。また、それぞれの VNT 候補の決定方法による平均制御回数を表 2 に示す。図 19 を見ると、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合の 3 つの場合で、それぞれが異なる傾向を持つことがわかる。VNT 候補をすべてランダムに算出した場合は、全体的に制御回数が多く、最も性能が良くないことがわかる。VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合を比べると、制御回数が約 10~100 回以上である確率は、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合の方が小さいが、制御回数が約 100 回以上である確率は、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合の方が小さい。その理由として、まず VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合は、すべての VNT 候補が平均ホップ長を考慮して選択されているため、一定のパターンに対しては速くアトラクターに収束できるが、それ以外のパターンに対してはゆらぎによる探索を続けても適したアトラクターを発見することができる可能性が低いことが考えられる。また、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合は、平均ホップ長を考慮した VNT 候補が少ない分、速くアトラクターに収束できるトラヒックパターン数が少なくなり、ゆらぎによる探索を行うため制御回数は多くなるが、ランダムに算出した VNT 候補が含まれているため、最終的に適したアトラクターを発見することができる可能性が高いことが考えられる。結果として、表 2 を見ると、平均的にはその 2 つの場合で平均制御回数の差は最大約 3 回で、あまり大きな差は見られないことがわかる。

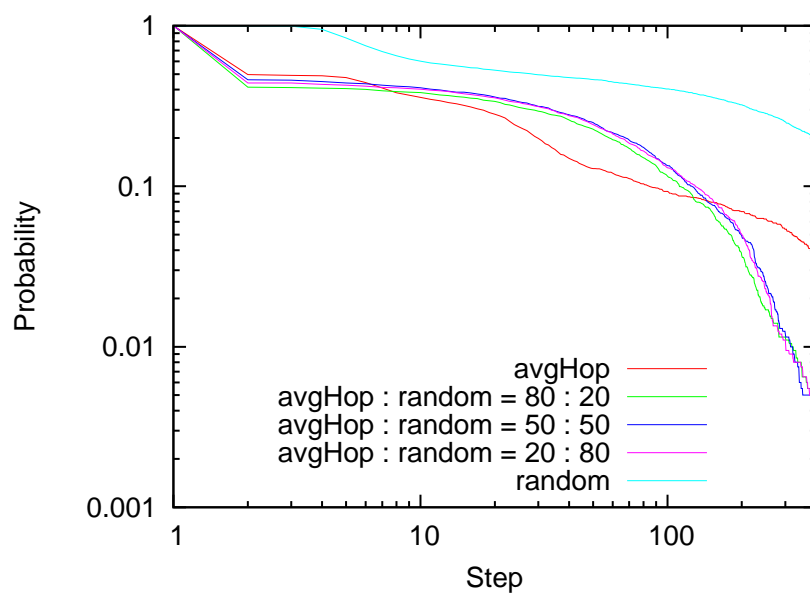


図 19: 制御回数分布 (トラフィックパターン 1)

表 2: 平均制御回数 (トラフィックパターン 1)

VNT 候補決定方法	平均制御回数 (回)
平均ホップ長順に選択した VNT 候補 100%	37.2
ホップ長順に選択した VNT 候補 80% ランダムに算出した VNT 候補 20%	33.9
ホップ長順に選択した VNT 候補 50% ランダムに算出した VNT 候補 50%	38.1
ホップ長順に選択した VNT 候補 20% ランダムに算出した VNT 候補 80%	37.6
ランダムに算出した VNT 候補 100%	136.5

表 3: 制御成功率 (トラヒックパターン 2)

VNT 候補決定方法	制御成功率 (%)
平均ホップ長順に選択した VNT 候補 100%	90.05
ホップ長順に選択した VNT 候補 80% ランダムに算出した VNT 候補 20%	94.6
ホップ長順に選択した VNT 候補 50% ランダムに算出した VNT 候補 50%	95.1
ホップ長順に選択した VNT 候補 20% ランダムに算出した VNT 候補 80%	94.95
ランダムに算出した VNT 候補 100%	90.5

次に、トラヒック需要が急激に変化した場合を想定したトラヒックパターンを与えた場合の評価結果について説明する。

VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの 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 制御を行ったときの最大リンク利用率のヒストグラムをそれぞれ図 20～図 24 に示す。図 20～図 24 を見ると、ランダムに算出した VNT 候補の割合が増えるほど、最大リンク利用率が 0.3 程度に抑えられているトラヒックパターン数が減少し、0.5 程度に抑えられているトラヒックパターン数が増加していることがわかる。しかし、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ため問題はない。

次に、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの VNT 候補を初期 VNT として与え、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成功率を表 3 に示す。表 3 を見ると、VNT 候補の決定方法によらず、どの場合も制御成功率が 90% 以上であることがわかる。VNT 候補の決定方法による制御成功率を比較すると、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定することで、制御成功率が改善されることがわかる。特に平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50%、ランダムに算出した VNT 候補を 50% とした場合が最も制御成功率が高く、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合と比較して、約 5% 制御成功率が改善されていることがわかる。

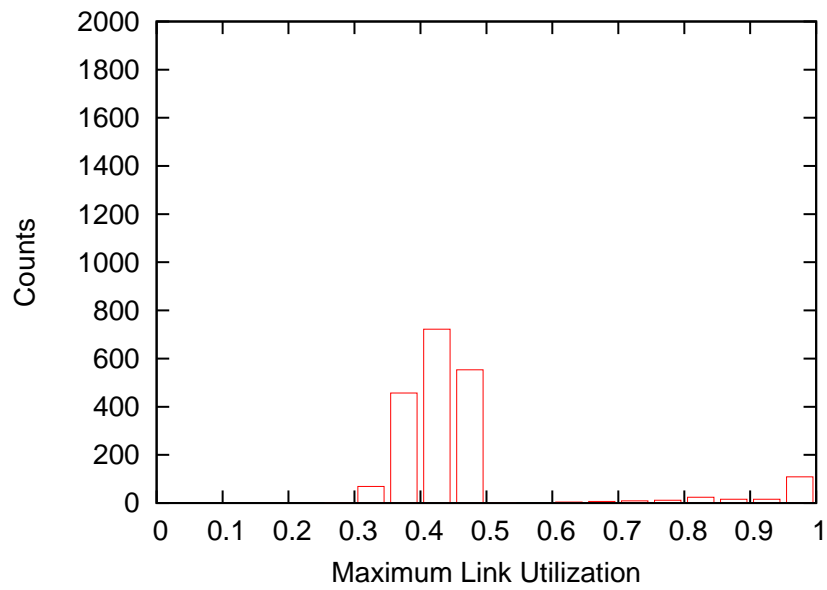


図 20: 最大リンク利用率 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 2)

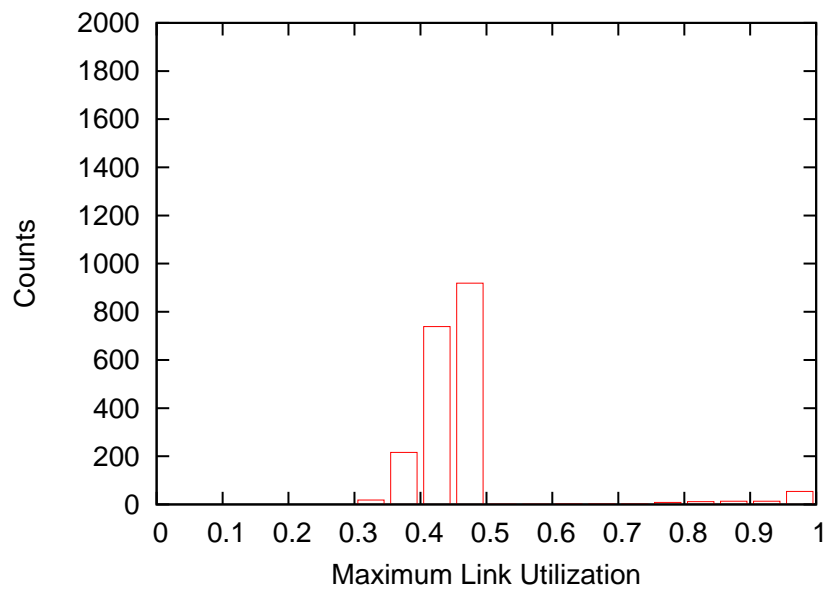


図 21: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 2)

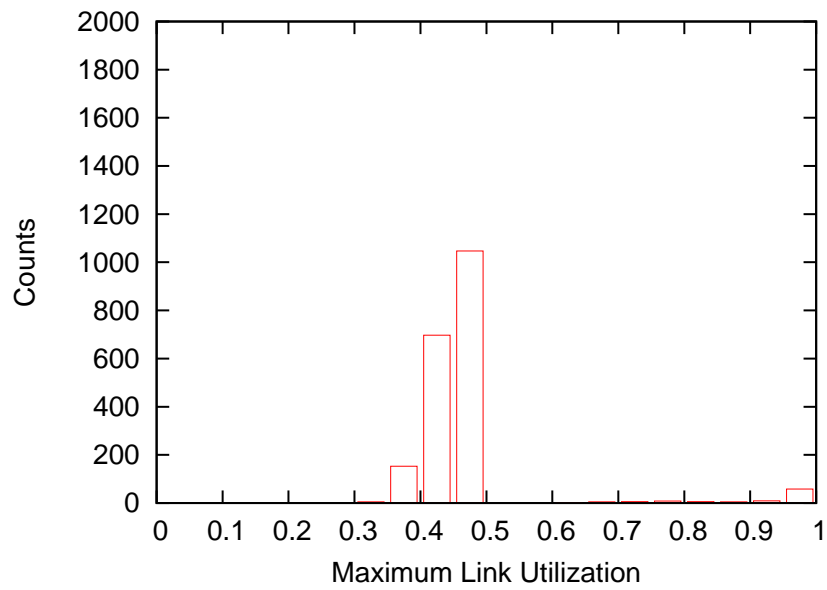


図 22: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラフィックパターン 2)

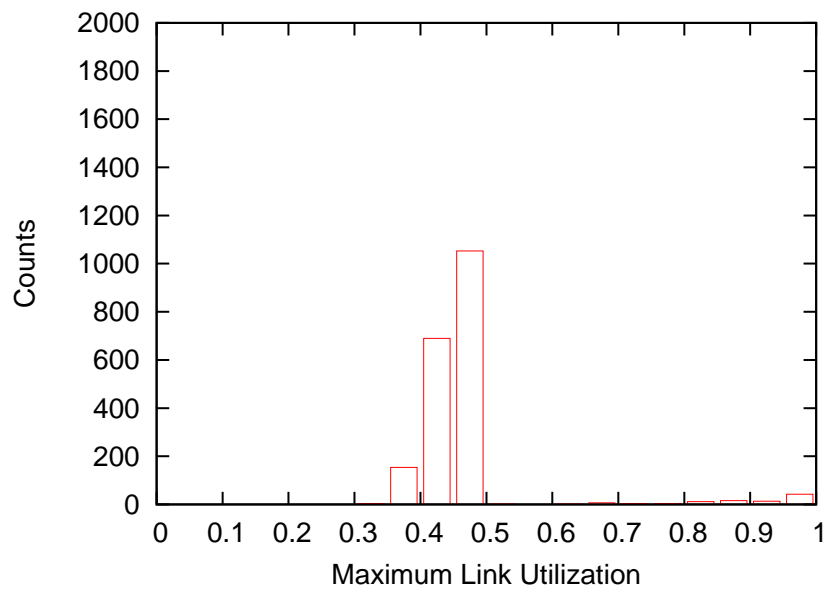


図 23: 最大リンク利用率 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラフィックパターン 2)

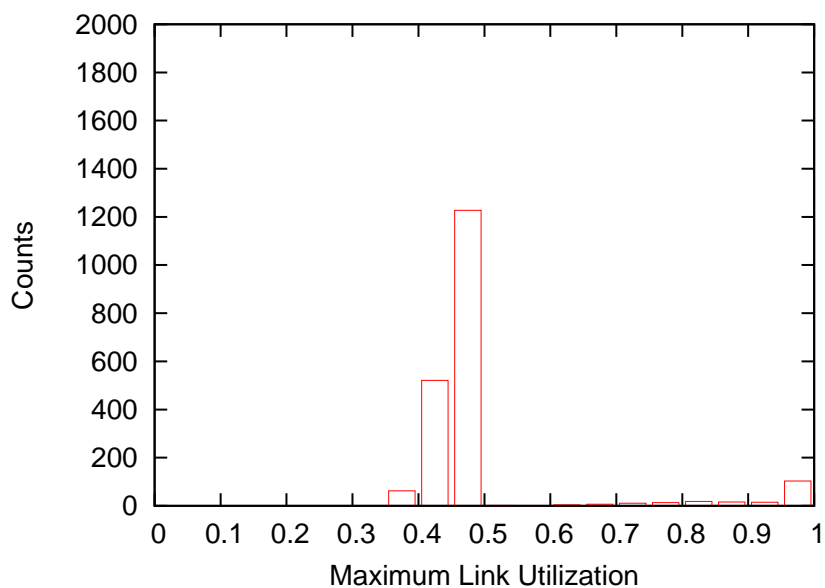


図 24: 最大リンク利用率 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラフィックパターン 2)

次に、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に、それぞれの 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 制御を行ったときの制御回数 of ヒストグラムをそれぞれ図 25～図 29 に示す。図 25～図 29 を見ると、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラフィックパターン数が 1400 パターンを下回り、制御回数が 400 回近いトラフィックパターン数が約 200 パターンあることがわかる。一方、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラフィックパターン数が 1600 パターン以上あり、制御回数が 400 回近いトラフィックパターン数が約 100 程度に抑えられていることがわかる。また、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合は、制御回数が 0～20 回となるトラフィックパターン数が 1600 パターン以上あるものの、制御回数が 400 回近いトラフィックパターン数も約 200 パターンあることがわかる。

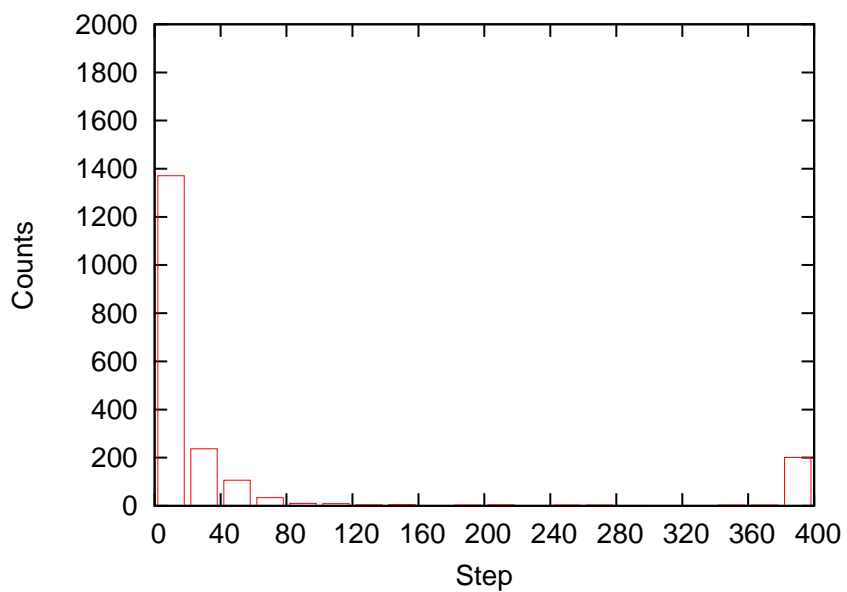


図 25: 制御回数 : VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合 (トラヒックパターン 2)

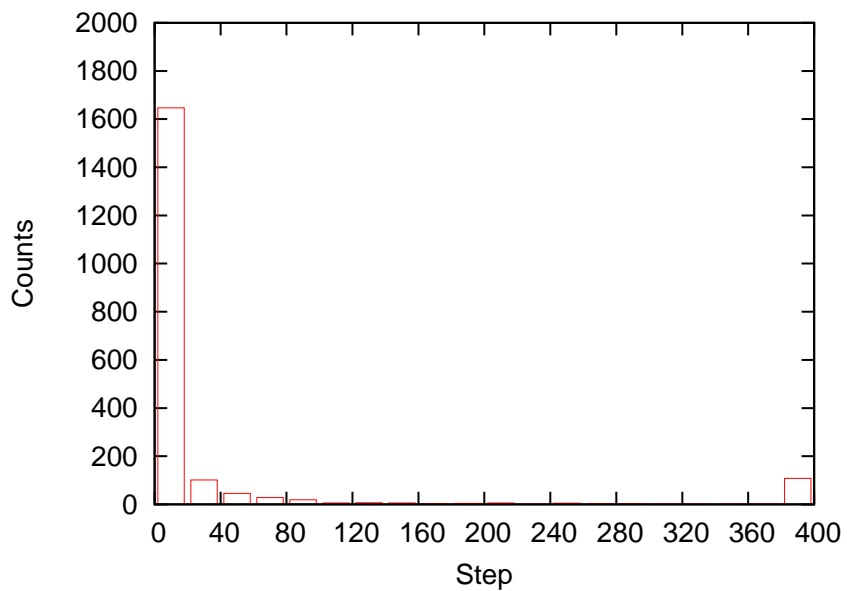


図 26: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 80% とした場合 (トラヒックパターン 2)

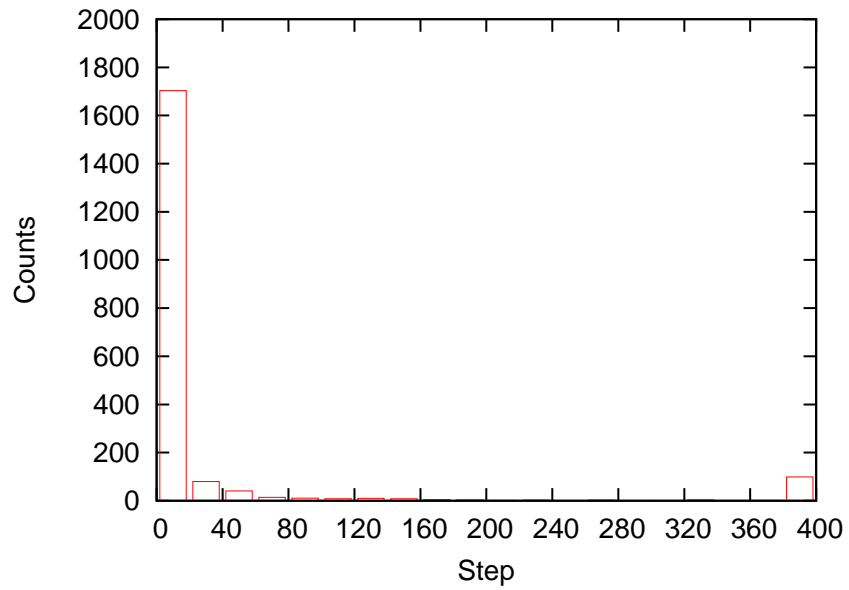


図 27: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 50% とした場合 (トラヒックパターン 2)

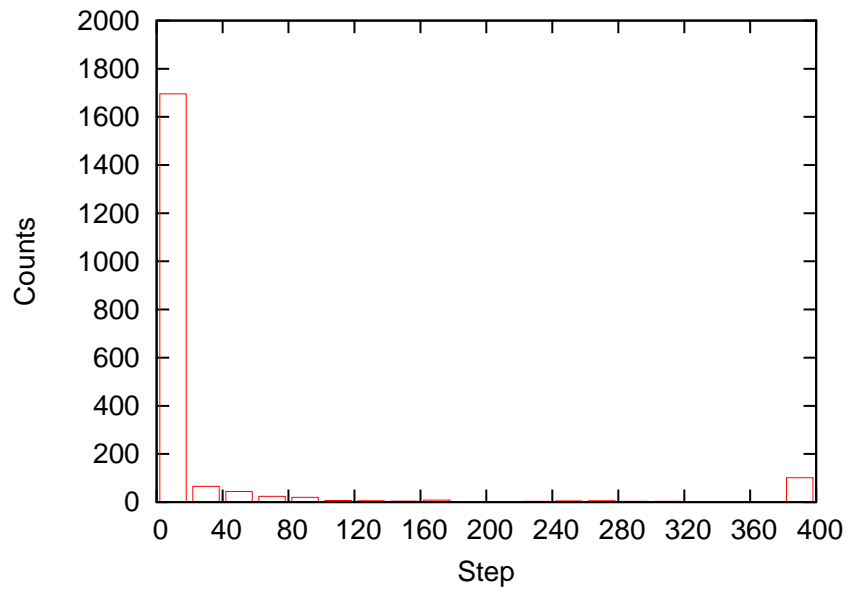


図 28: 制御回数 : ホップ長順に選択した VNT 候補 20% とした場合 (トラヒックパターン 2)

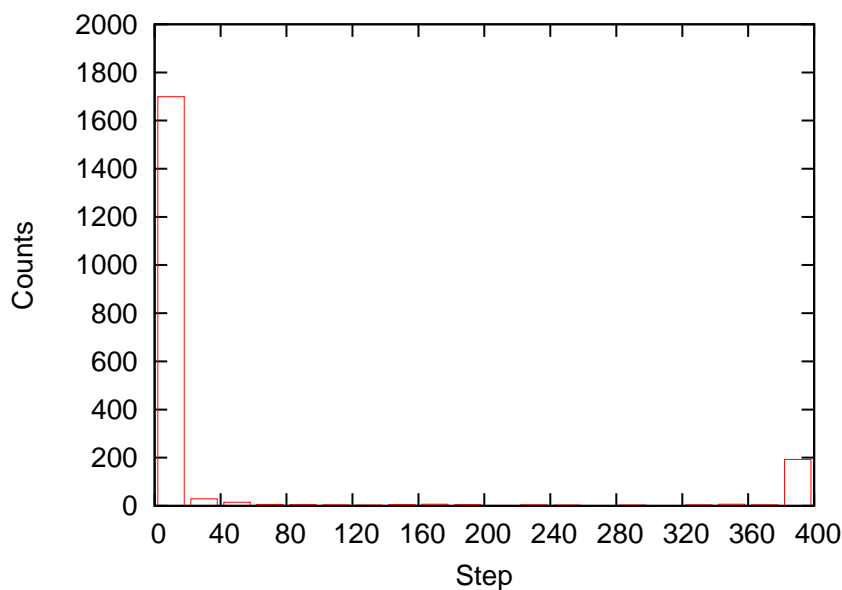


図 29: 制御回数 : VNT 候補をすべてランダムに算出した場合 (トラヒックパターン 2)

次に、VNT 候補の決定方法による制御回数の分布を図 30 に示す。また、それぞれの VNT 候補の決定方法による平均制御回数を表 4 に示す。図 30 を見ると、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 80% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 20% とした場合、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50% とした場合の順に、制御回数が横軸の値以上である確率が小さくなっていることがわかる。このことから、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50%、ランダムに算出した VNT 候補を 50% とした場合が制御回数を最も小さい値に抑えられていることがわかる。また表 4 を見ても、先と同様の順番に平均制御回数が小さくなっており、平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50%、ランダムに算出した VNT 候補を 50% とした場合は、VNT 候補をすべて平均ホップ長順に選択した場合に比べ、平均制御回数を約 25 回削減していることがわかる。また、VNT 候補をすべてランダムに算出した場合に比べ、平均制御回数を約 19 回削減していることがわかる。

以上の結果から、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定することで、制御成功率、制御回数ともに改善することができ、特に平均ホップ長順に選択した VNT 候補を 50%、ランダムに算出した VNT 候補を 50% とした場合が最も性能が改善されることがわかる。

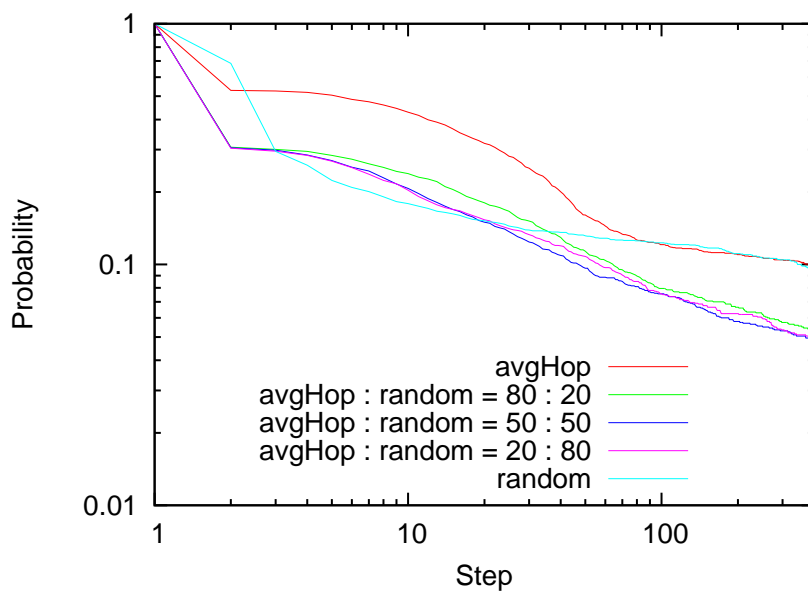


図 30: 制御回数の分布 (トラフィックパターン 2)

表 4: 平均制御回数 (トラフィックパターン 2)

VNT 候補決定方法	平均制御回数 (回)
平均ホップ長順に選択した VNT 候補 100%	54.3
ホップ長順に選択した VNT 候補 80% ランダムに算出した VNT 候補 20%	32.7
ホップ長順に選択した VNT 候補 50% ランダムに算出した VNT 候補 50%	29.2
ホップ長順に選択した VNT 候補 20% ランダムに算出した VNT 候補 80%	30.3
ランダムに算出した VNT 候補 100%	47.9

6 まとめと今後の課題

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、アトラクターとなる VNT 候補の決定手法を提案した。提案した決定手法では、ヒューリスティックな手法である I-MLTDA により算出され、平均ホップ長が小さい順に選択した VNT 候補に、ランダムに算出した VNT 候補を合わせることで、VNT 候補を決定している。提案手法では、平均ホップ長順に選択した VNT 候補にランダムに算出した VNT 候補を合わせて VNT 候補を決定することで、VNT 制御の性能が改善されることが明らかとなった。特に、平均ホップ長順に選択した VNT 候補 50%、ランダムに算出した VNT 候補 50% を合わせて VNT 候補を決定した場合が、最も VNT 制御の性能が改善されることが明らかとなった。

本報告では、提案手法により決定された仮想網候補が、どの程度トラフィック需要の変化に適応できるかを評価したが、今後は、提案手法により決定された仮想網候補が、ネットワーク機器の故障といった環境変化にどの程度対応できるかを評価する予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導くださいました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授、ならびに日頃より熱心にご指導くださいまし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、大阪大学大学院情報科学研究科の小泉佑揮助教、ならびに大阪大学大学院情報科学研究科の大下裕一助教には適切な助言を頂きました。心より御礼申し上げます。最後に、様々な助言をくださった水元宏治氏をはじめ、村田研究室の方々にも御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Li, G. Mohan, E. Tien, and K. Chua, “Dynamic routing with inaccurate link state information in integrated IP-over-WDM networks,” *Computer Networks*, vol. 46, no. 6, pp. 829–851, Dec. 2004.
- [2] T. Ye, Q. Zeng, Y. Su, L. Leng, W. Wei, Z. Zhang, W. Guo, and Y. Jin, “On-line integrated routing in dynamic multifiber IP/WDM networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 9, pp. 1681–1691, Nov. 2004.
- [3] 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.
- [4] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, “On IP-over-WDM integration,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 72–84, May 2000.
- [5] M. Kodialam and T. Lakshman, “Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, Apr. 2001, pp. 358–366.
- [6] J. Comellas, R. Martínez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, “Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks,” *IEEE Network Magazine*, vol. 17, no. 2, pp. 22–27, Mar. 2003.
- [7] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, “An integrated routing mechanism for cross-layer traffic engineering in IP over WDM networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 90, no. 5, pp. 1142–1151, May 2007.
- [8] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, “Some principles for designing a wide-area WDM optical network,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 5, pp. 684–696, Oct. 1996.
- [9] R. Ramaswami and K. Sivarajan, “Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 840–851, Jun. 1996.

- [10] 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, no. 3, pp. 281–288, Jun. 1995.
- [11] F. Ricciato, S. Salsano, A. Belmonte, and M. Listanti, "Off-line configuration of a MPLS over WDM network under time-varying offered traffic," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, Jun. 2002, pp. 57–65.
- [12] 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.
- [13] A. Gençata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, no. 2, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] B. Ramamurthy and A. Ramakrishnan, "Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical WDM networks," in *Proceedings of GLOBECOM*, vol. 2, Nov. 2000, pp. 1269–1275.
- [17] S. Gieselmann, N. Singhal, and B. Mukherjee, "Minimum-cost virtual-topology adaptation for optical WDM mesh networks," in *Proceedings of IEEE ICC*, vol. 3, Jun. 2005, pp. 1787–1791.
- [18] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 4, Mar. 2005, pp. 2543–2553.
- [19] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Stability of virtual network topology control for overlay routing services," *OSA Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 7, pp. 704–719, Jul. 2008.

- [20] —, “Adaptive virtual network topology control based on attractor selection,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 11, pp. 1720–1731, Jun. 2010.
- [21] 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.
- [22] 水元宏治, “WDM ネットワークにおける自己組織型仮想網制御の仮想網算出の計算量削減手法の提案と評価,” *大阪大学基礎工学部情報科学科特別研究報告*, pp. 1–33, Feb. 2012.
- [23] 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.
- [24] 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>.