

特別研究報告

題目

自己組織型仮想網制御手法の制御オーバーヘッドの評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

山添 伸晃

平成 22 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

自己組織型仮想網制御手法の制御オーバーヘッドの評価

山添 伸晃

内容梗概

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フィック需要が増大するとともに、トラフィック変動が大きくなることが指摘されている。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光ネットワークに收容するための通信形態として、複数の光パスから構成される仮想網の制御手法の研究がなされている。

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仮想網の制御手法として、自己組織型の仮想網制御手法であるアトラクター選択を用いた仮想網制御手法を考案している。アトラクター選択を用いた仮想網制御手法では、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つの振る舞いが仮想網上の通信品質の状態を示すフィードバック値によって仮想網が制御される。これまで、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。しかし、ネットワーク規模のスケラビリティの観点からは、より少ない制御情報で自己組織的かつ局所的に仮想網を再構築する制御アプローチが有用であるが、従来の評価では評価指標として光パス利用率を用いており、考案した仮想網制御手法の制御オーバーヘッドは明らかになっていない。

そこで、本報告では、我々の研究グループが考案したアトラクター選択を用いた仮想網制御手法の制御オーバーヘッドを明らかにする。制御オーバーヘッドとして、VNT の再構築に必要となる光パスの切替回数に着目し、計算機シミュレーションにより集中型の制御アプローチと比較評価した。その結果、アトラクター選択を用いた仮想網制御手法では、集中型の制御アプローチと比較して、光パスの切替回数が1/100以下に削減されることがわかった。また、同一の制御情報量により仮想網を制御する場合、アトラクター選択を用いた仮想網制御手法は、ネットワークの状態を示すフィードバック値のみが光ネットワーク全体で共有されることに起因し、集中型の制御アプローチと比較して光パス利用率の最大値が半減されることが明らかとなった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing) 、 IP (Internet Protocol) 、 VNT 制御、 アトラクター選択、 自己組織化制御

目次

1	はじめに	6
2	IP-over-WDM ネットワーク	9
3	集中型の仮想網制御手法	13
3.1	MLDA: Minimum Delay Logical Topology Design Algorithm	13
3.2	WR-LDA: Wavelength Reuse-based Logical topology Design Algorithm . .	14
4	アトラクター選択を用いた仮想網制御手法	16
4.1	アトラクター選択モデル	16
4.1.1	概要	16
4.1.2	遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択	16
4.1.3	アトラクター選択の数学モデル	18
4.2	アトラクター選択を用いた仮想網制御手法	20
4.2.1	概要	20
4.2.2	遺伝子発現量と光パス要求量	21
4.2.3	遺伝子発現の活性・抑制を用いた光パス要求量の制御	23
4.2.4	代謝ネットワークの活性度と仮想網の活性度	24
4.2.5	ポート数制約	25
5	性能評価	27
5.1	評価環境	27
5.1.1	物理トポロジ	27
5.1.2	環境変化	28
5.1.3	評価指標	28
5.1.4	比較手法	29
5.2	評価結果	29
5.2.1	制御情報量に制約がない場合	29
5.2.2	制御情報量を同一とする場合	34
5.2.3	トラヒック変動に時間的相関がある場合	39
6	まとめと今後の課題	42
	謝辞	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	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	遺伝子・代謝ネットワーク	17
8	遺伝子・代謝ネットワークと IP-over-WDM ネットワークの対応付け	20
9	アトラクター選択を用いた仮想網制御のフローチャート	21
10	$\theta_{p_{ij}}$ とシグモイド関数の変化	23
11	最大リンク利用率と成長レートの関係	25
12	EON トポロジ	27
13	最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$	31
14	光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$	31
15	最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$	32
16	光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$	32
17	最大リンク利用率の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$	33
18	光パス切替回数の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$	33
19	最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$	36
20	光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$	36
21	最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$	37
22	光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$	37
23	最大リンク利用率の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$	38
24	光パス切替回数の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$	38
25	トラヒック変動の大きさと光パス切替回数の関係 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$	41
26	トラヒック変動の大きさと光パス切替回数の関係 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$	41

1 はじめに

インターネットを流れるトラフィックは増加しており、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) による高速・大容量のデータ伝送技術の適用が有望視されている。WDM を用いたネットワークの通信形態として様々な議論がなされているが、その 1 つに波長ルーティングを用いた光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 (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-packet over WDM ネットワークが広く検討されている [1-12]。

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、2つの方式が考えられている。1つは、ノード間のトラフィック需要を長期に渡って計測することで算出し、それらのトラフィ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 [7-9]。例えば、文献 [7] では、ノード間のトラフィック需要を長期に渡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 における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、トラフィ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 [10-12]。文献 [10] 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おり、[11] や [12] では、短時間のリンク上のトラフィック量を短期間計測し、トラフィック需要を推定して VNT を再構成するトラフィックエンジニアリング手法が提案されている。

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フィック需要の変化が大きくなることが指摘されている [13, 14]。文献 [13] では、オーバーレイネットワークと既存のトラフィックエンジニアリングとの相互作用によって、トラフィ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。トラフィ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フィックマトリクスを取得し VNT を設計する手法では、トラフィ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。従って、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変動に対して適応的に VNT を再構成する VNT 制御手法が必要である。

我々の研究グループでは、分オーダーでのトラヒック変動や未知のトラヒック変動への適応性を有する手法として、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 VNT 制御手法を提案している [15]。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。急激なトラヒック変動もしくは未知のトラヒ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。環境の変化を遺伝子に伝達するシステムを有することなくその変化に対して適応する生物システムをモデル化した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ヒ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適応する VNT 制御を実現している。アトラクター選択を用いた VNT 制御により、トラヒ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 [15]、および、より大きいトラヒック変化に対しても VNT のリンク利用率が改善されるとともに、改善に必要となる制御時間も少なくなることが明らかとなっている [16]。以降では、光パスの利用率、すなわち、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。

集中型の制御アプローチでは、光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、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。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。

文献 [17] では、センサーネットワークを対象として、自己組織化に基づく制御技術の特性を分析している。自己組織化制御の利点として、局所情報にもとづいてのみ制御が行われ、制御情報の全体共有が行われなため、制御情報に誤差が含まれる場合でもネットワーク全体の制御に波及しないことが挙げられている。ただし、これらの自己組織化に基づく制御技術の特性分析は、主にセンサーネットワークを対象になされており、光ネットワークを対象とした自己組織化制御の特性については明らかになっていない。特に、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、ネットワークの状態を示すフィードバック値が光ネットワーク全体で共有されることから、光ネットワーク上に構築される VNT の制御技術のオーバーヘッドについて、定量的に評価する必要がある。

そこで、本報告では、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法の制御オーバーヘッドを定量的に明らかにする。ここで言う制御オーバーヘッドとは、VNT の再構築に必要なとなる

光パスの切替回数である。まず、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と集中型の VNT 制御手法の制御オーバーヘッドを計算機シミュレーションにより比較評価する。集中型の VNT 制御手法では、管理ノードにおいて全体最適化により算出される VNT が既存の VNT 構成と大きく異なることを示し、これにより、再構築時間の増大ならびに再構築中のトラフィックが享受する通信品質に甚大な影響を与えることを明らかにする。

次に、集中型の VNT 制御手法において、トラフィック変動に対して迅速に VNT を再構成するために、一部の制御情報から全体の制御情報を推定し、その上で VNT を算出する場合の制御オーバーヘッドを評価する。具体的には、VNT のリンク利用率を一部の制御情報として取得し、トラフィック行列推定手法によりトラフィック需要を推定し、集中型の VNT 制御手法を適用する。評価の結果、集中型の VNT 制御手法の場合、トラフィック行列の推定に伴う推定誤差が VNT 制御に大きく影響し、ネットワーク性能が改善されず、その結果、制御オーバーヘッドが増大することを明らかにする。

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、WDM ネットワークを対象とした既存の VNT 制御手法を説明する。4 章では、遺伝子と代謝ネットワークにおけるアトラクター選択について説明し、さらにアトラクター選択を用いた VNT 制御についての詳細を述べる。5 章で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後の課題について述べる。

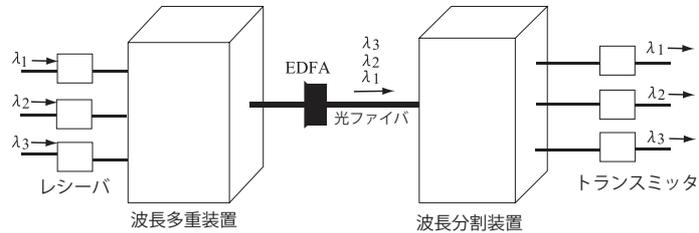


図 1: WDM 伝送システム

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。

まず WDM 技術について説明する。図 1 に WDM 技術を用いた伝送システムを示す。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。

次に IP-over-WDM ネットワークについて説明する。IP-over-WDM ネットワークは、インターネットトラフィックの伝送に 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

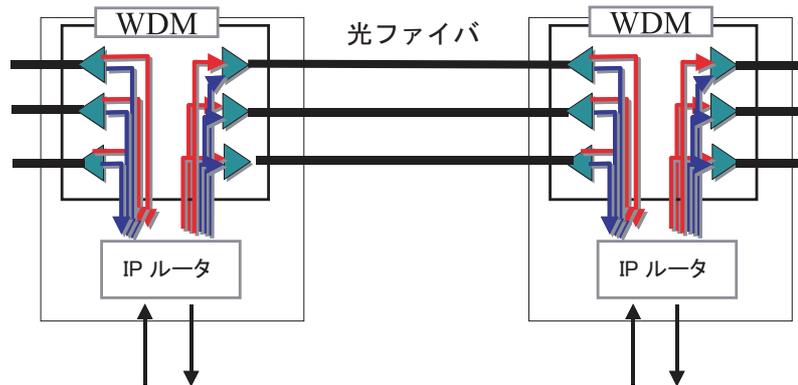


図 2: IP-over-WDM : ポイントポイント間通信

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ンネルのことである。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。

例えば、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。この時、図 4 のようにノード N_2 において λ_2 を連結することによって、ノード N_1 、 N_3 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 N_1 とノード N_3 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と呼ぶ。

図 6 は、本報告で想定する IP-over-WDM ネットワークの図である。図 6 に示すように、VNT 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 が決定される。

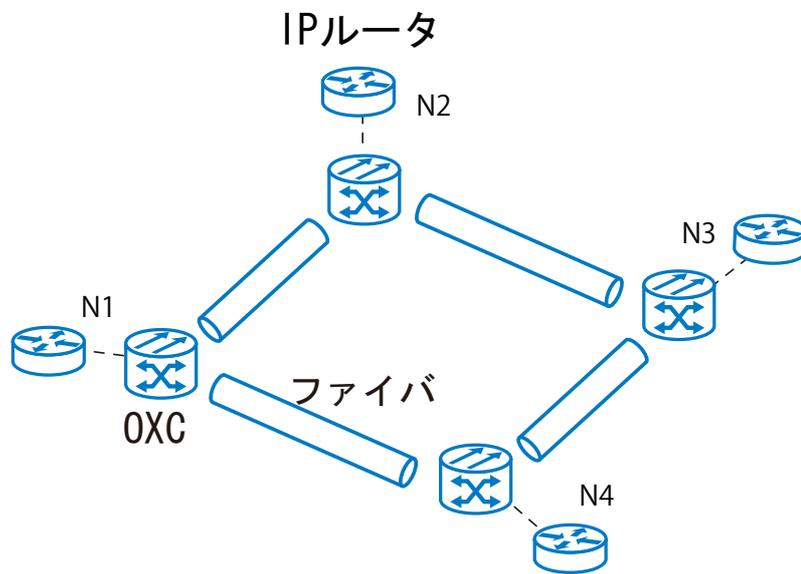


図 3: 物理トポロジ

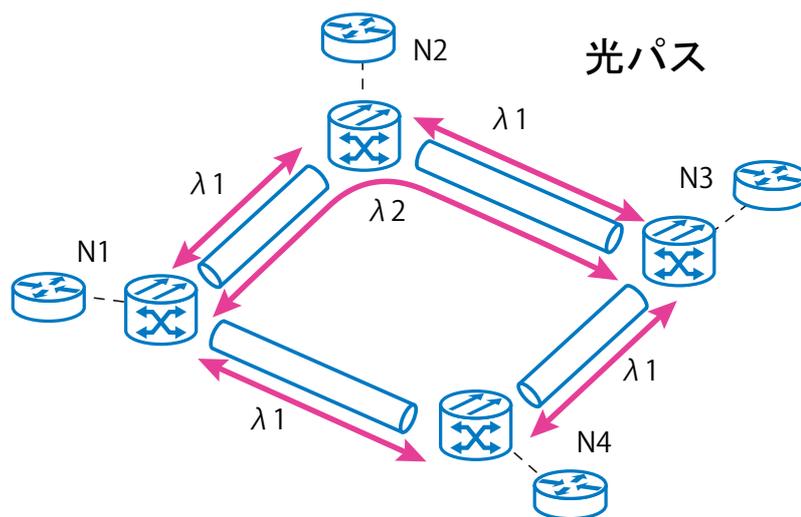


図 4: 光パスの設定例

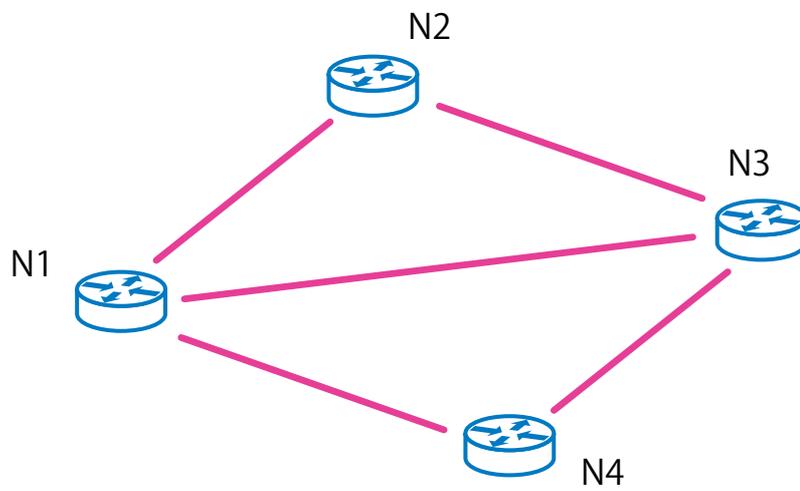


図 5: 仮想網 (VNT)

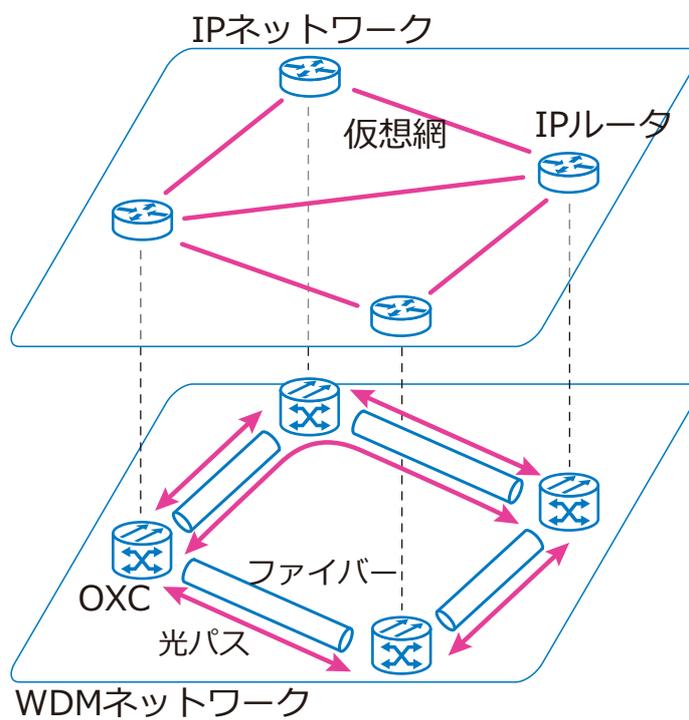


図 6: IP-over-WDM ネットワーク

3 集中型の仮想網制御手法

本章では、既存の集中型の VNT 制御手法を説明する。

3.1 MLDA: Minimum Delay Logical Topology Design Algorithm

MLDA は文献 [7] で提案されているヒューリスティックな VNT 制御手法である。

与パラメータ

P_{ij} : 物理トポロジの連結行列。ノード i とノード j 間に光ファイバが敷設されている場合、
1、そうでなければ 0

d_i^{in} : ノード i の入力ポート数

d_i^{out} : ノード j の出力ポート数

T_{ij} : ノード i とノード j 間のトラヒック需要。 T_{ij} により構成される行列 T をトラヒック行列と呼ぶ。

上記パラメータのうち、 P_{ij} 、 d_i^{in} 、 d_i^{out} は WDM ネットワークの物理構成依存のパラメータである。 T_{ij} は物理構成非依存のパラメータであり、文献 [7] では、 T_{ij} は長期的な計測によりトラヒック需要を取得するものとしている。

MLDA

MLDA のアルゴリズムは以下の通りである。

Step. 1 要求されるトラヒック需要が最も多いノードペア ij を T から選ぶ。この時、 T_{ij} が 0 であれば、アルゴリズムを終了する。そうでなければ Step. 2 へ。

Step. 2 変数 t 、 v の初期化： $t \leftarrow i$ 、 $v \leftarrow j$ として Step. 3 へ。

Step. 3 ノード tv 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のみ設定する。すなわち、 d_t^{out} および d_v^{in} がともに 1 以上である場合に光パスをのみ設定し、それぞれを 1 減じる。Step. 4 へ

Step. 4 トラヒック行列 T を更新する。トラヒック需要が 2 番目に多いノードペア $i'j'$ を選択する。 $T_{ij} \leftarrow T_{ij} - T_{i'j'}$ とし、Step. 1 へ。

MLDA では、ノード tv 間の光パスを設定する際に、伝搬遅延時間に関する最短経路上に光パスを設定している。これは、上位層の IP ルーティングプロトコルとして、エンドノード間のトラヒックの遅延時間を指標としているためであり、上位層が決定する各ノード間の最短経路と WDM 層が決定する各ノード間の最短経路を等しくするためである。本報告では、ノード tv 間の光パスは、物理トポロジ上での最短ホップ経路を利用するものとする。

MLDA は、トラヒック需要が最大となるノード間に光パスを構築することで、多くのトラヒックを光パスを用いて転送しノードにおける上位プロトコル処理を削減するものである。しかし、光パスに流れるトラヒック量は、上位プロトコルである IP の経路制御に大きく依存する。従って、上位プロトコルである IP の経路制御を考慮しつつ光パスを設定することで、更なる性能改善が見込まれる。次節では、上位プロトコルである IP の経路制御を考慮した VNT 制御手法 [8] を説明する。文献 [8] の手法は、IP の経路を考慮しつつより多くのトラヒックが経路するノード間に光パスを設定することから、以降では WR-LDA (Wavelength reuse-based Logical topology Design Algorithm) と表記する。

3.2 WR-LDA: Wavelength Reuse-based Logical topology Design Algorithm

文献 [8] では、上位プロトコルである IP の経路制御を考慮した VNT 制御手法が提案されている。本報告では、文献 [8] の手法を WR-LDA (Wavelength reuse-based Logical topology Design Algorithm) と呼ぶ。WR-LDA では、MLDA と同様、対地間トラヒック量の降順でノード間に光パスを設定する。ただし、ある光パス L_a が設定されると、 L_a を構成する光ファイバ集合 $\{F_a^1, F_a^2, \dots, F_a^h\}$ (h は光パスの物理ホップ数) を経路しないノード間に光パスを設定する。これは、光パス L_a によってノード間に仮想的なリンクが構築されると、IP の経路制御により光ファイバ集合 $\{F_a^1, F_a^2, \dots, F_a^h\}$ を経路する他の対地間トラヒックも L_a を利用することとなるためである。WR-LDA の具体的なアルゴリズムは以下の通りである。

WR-LDA

アルゴリズムの説明にあたって、以下の表記を導入する。

$m_e^{(sd)}$: ノード sd 間の最短ホップ経路が、光ファイバ e を経路するとき 1、それ以外は 0

WR-LDA のアルゴリズムは以下の通りである。

Step. 1 対地間のトラヒック需要降順にノードペア番号 $(1, \dots, p)$ を定める。また、すべての光ファイバ $e (1, \dots, L)$ に対して、物理トポロジ P_{ij} から最短ホップ経路を計算し、 $m_e^{(sd)}$ を計算する。 $m_e^{(sd)}$ ノードペアから構成される $p \times L$ の行列を \mathbf{m} とする。Step. 2 へ。

Step. 2 ノードペア番号 1、すなわち、最もトラヒック需要の多い対地間に光パスを設定する。光パスの始点および終点となるノードにおいて、残余ポート数を 1 減じる。ノードペア番号を格納する変数 $k \leftarrow 1$ とする。

Step. 3 ノードペア番号 $k+1$ からノード対番号 p までの各ノードペア番号 j について、 m_j^k が 1 である場合、 \mathbf{m} から列 j を削除する。Step. 4 へ。

Step. 4 Step. 3 で同一の光ファイバを経由するノードペアが \mathbf{m} から取り除かれている。 \mathbf{m} の第一列に対応するノードペア l に対して光パスを設定する。光パスの始点および終点となるノードにおいて、残余ポート数を 1 減じ、 $k \leftarrow l$ として Step. 3 へ。残余ポート数がない場合、 \mathbf{m} から第一列を削除し $k \leftarrow l$ とし、Step. 3 へ。 k が p となった場合、Step. 5 へ。

Step. 5 アルゴリズムを停止する

4 アトラクター選択を用いた仮想網制御手法

4.1 アトラクター選択モデル

4.1.1 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。アトラクターをも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成長レート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、アトラクターをもつ制御構造とゆらぎを、成長レート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。次章では、本報告で注目する細胞内の遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択について述べる。

4.1.2 遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択

本報告では、文献 [18] で説明されている、細胞内の遺伝子と代謝ネットワークにおけるアトラクター選択に注目する。図 7 に、細胞内の代謝物が遺伝子によって制御される遺伝子・代謝ネットワークを示す。細胞は、図 7 上部に示した遺伝子ネットワークと、下部に示した代謝ネットワークから構成される。

遺伝子ネットワーク上の各遺伝子は、タンパク質の発現レベルと呼ばれる値を持ち、アトラクターをもつ制御構造とゆらぎによって制御されている。遺伝子は、相互に活性と抑制の関係をおよぼしあいながら、タンパク質の発現レベルを制御している。図中には、活性と抑制の関係をそれぞれ赤と青の矢印で示している。アトラクターをもつ制御構造は、この遺伝子間の活性と抑制の関係によって決まる。

代謝ネットワークでは、代謝反応によって、生物の成長に必要な基質を生成している。図中では、代謝反応を基質の流れとして示している。タンパク質の発現レベルは、対応する代謝反応の強さを触媒作用によって制御している。図中では、触媒作用を遺伝子から代謝反応への破線矢印で示している。代謝反応と細胞外部からの基質の摂取によって各基質の濃度が変化する。

細胞の成長レートは、代謝反応の結果によって決定される。細胞が成長するためには、ある一部の必須基質の濃度が上昇する必要がある。必須基質の濃度が上昇すると、細胞の成長

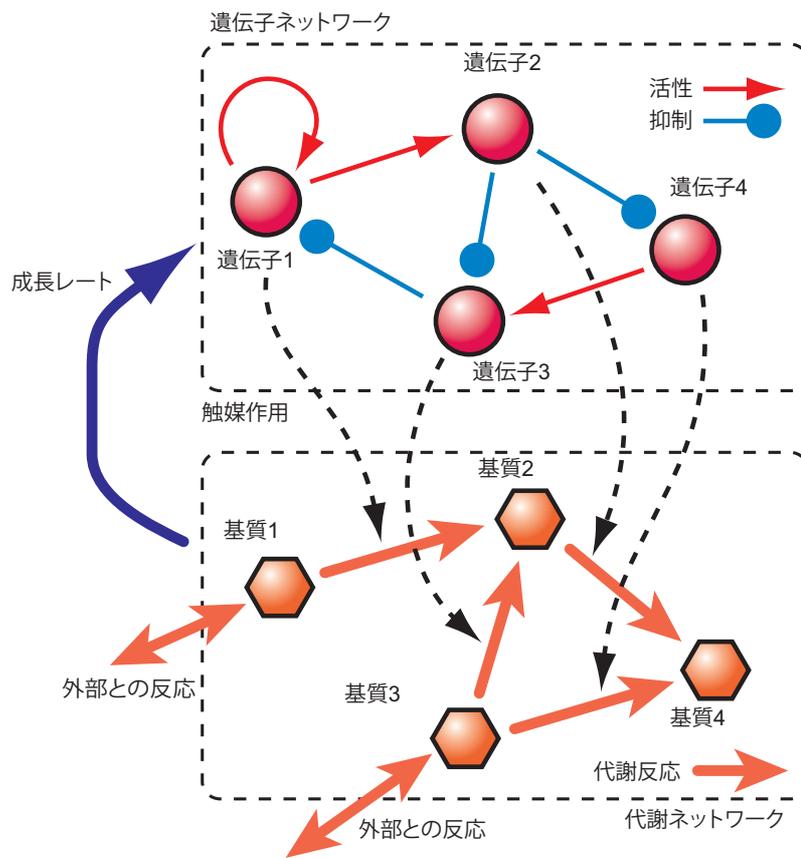


図 7: 遺伝子・代謝ネットワーク

が促進されるため、成長レートが増加する。したがって、細胞では、これらの必須基質の濃度を細胞内のネットワークの動きが上手く行っているかどうかの指標として用いている。遺伝子ネットワークは、成長レートを代謝ネットワークの動きが上手く行っているかどうかを知るためのフィードバックとして利用し、アトラクターをもつ制御構造とゆらぎを制御している。細胞が外部から摂取可能な基質が変化するなどの環境変化が生じ、必須基質が十分に生成できなくなった場合は、成長レートが低下する。成長レートが低下すると、遺伝子ネットワーク内の発現レベルがゆらぎによってランダムに変化する。発現レベルが変化することで、代謝反応の強さが変化する。代謝反応の強さが変化し、必須基質が十分に生成されると、それに応じて成長レートが増加する。成長レートが増加すると、アトラクターをもつ制御構造が支配的に遺伝子ネットワークを制御し、アトラクターに安定的に収束する。

4.1.3 アトラクター選択の数学モデル

細胞の状態は、 n 個の遺伝子上のタンパク質の発現レベル (x_1, x_2, \dots, x_n) と、 m 個の基質の濃度 (y_1, y_2, \dots, y_m) によって表現される。遺伝子 i 上のタンパク質の発現レベル x_i は以下の微分方程式で表される。

$$\frac{dx_i}{dt} = v_g \cdot \left(f \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta \quad (1)$$

遺伝子 i の右辺の第一項はアトラクターを持つ制御構造である。第一項では、遺伝子間の活性と抑制の相互作用の関係が制御行列 W_{ij} によって表現されている。 W_{ij} は $\{-1, 0, 1\}$ からなる行列であり、遺伝子 i のタンパク質の発現と遺伝子 j のタンパク質の発現の関係を示している。それぞれの値は以下の意味を持つ。

1 遺伝子 i のタンパク質の発現が遺伝子 j のタンパク質の発現に活性される

0 タンパク質 i の発現がタンパク質 j の発現に影響されない

-1 タンパク質 i の発現がタンパク質 j の発現に抑制される

発現レベルの増加速度は以下のシグモイド関数 $f(z)$ で決定される。

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-\mu z}} \quad (2)$$

ここで、 $\sum_j W_{ij} \cdot x_j$ は、遺伝子 i が他の遺伝子から受ける相互作用の総量であり、閾値 θ を超えると、遺伝子 i のタンパク質の発現レベルの増加速度が上昇する。 μ はシグモイド関数のゲインを表す定数である。第二項 η はゆらぎであり、文献 [18] では、ホワイトガウシアンノイズが使われている。ゆらぎは、タンパク質の発現とは独立しており、その強さは一定

である。すなわち、ゆらぎは、タンパク質の発現レベルの変化に対して、常に一定の影響を与えている。第一項のアトラクターを持つ制御構造と第二項のゆらぎは、成長レート v_g によってコントロールされている。

代謝ネットワークでは、代謝反応と細胞外部からの基質の浸透によって基質の濃度が変化している。基質 i の濃度 y_i は以下の微分方程式で表される。

$$\frac{dy_i}{dt} = \epsilon \cdot \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \text{Con}(k, j, i) \cdot x_j \cdot y_k - \sum_{j'=1}^n \sum_{k'=1}^m \text{Con}(i, j', k') \cdot x_{j'} \cdot y_i \right) + D \cdot (Y_i - y_i) \quad (3)$$

ϵ は代謝反応の係数である。 $\text{Con}(i, j, k)$ は代謝反応と、それに対して触媒作用を及ぼす遺伝子の関係を表す行列であり、基質 i から基質 k への代謝反応が遺伝子 j タンパク質の発現レベルに影響されるときに 1 とし、それ以外の場合は 0 とする。右辺第一項は基質の生成および消費を表す項である。第二項は細胞膜を通過して外部から供給される基質を表している。 Y_i は細胞外部の基質 i の濃度を表す。係数 D は細胞外部からの栄養素の流入の強さを表す係数である。細胞外部からの基質 i の流入は Y_j と y_i の差に比例していることを示している。

細胞の成長にはある必須基質の濃度が十分高い必要があり、成長レートはその必須基質の濃度に関する増加関数として定義されている。細胞の成長に必須である基質を (y_1, y_2, \dots, y_r) として、その中で最も低い濃度が成長レート v_g を決める。成長レートは、以下の式で表される。

$$v_g \propto \min(y_1, y_2, \dots, y_r) \quad (4)$$

成長レート v_g は、代謝反応ネットワークが円滑に動いているかを表す指標として、遺伝子ネットワークにフィードバックされる。遺伝子ネットワークでは v_g をもとに、アトラクターを持つ制御構造とゆらぎを制御する。細胞が外部から摂取可能な基質の濃度 Y_i が変化するなどの環境変化が生じ、必須基質の濃度が低下すると、 v_g が低下する。 v_g が低下すると、式 (1) では、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 の変化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、式 (3) において、代謝反応の強さが変化する。代謝反応の強さの変化によって必須基質の濃度が上昇すると、 v_g が増加する。 v_g が大きくなると、式 (1) において、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強くなり、細胞はアトラクターを持つ制御構造により、安定的にアトラクターに収束する。このように、細胞では、遺伝子ネットワークが代謝反応ネットワークからのフィードバックを用いて、アトラクターを持つ制御構造とゆらぎをコントロールしており、環境変化によって v_g が低下したとしても、その変化に対して適応的に動作している。

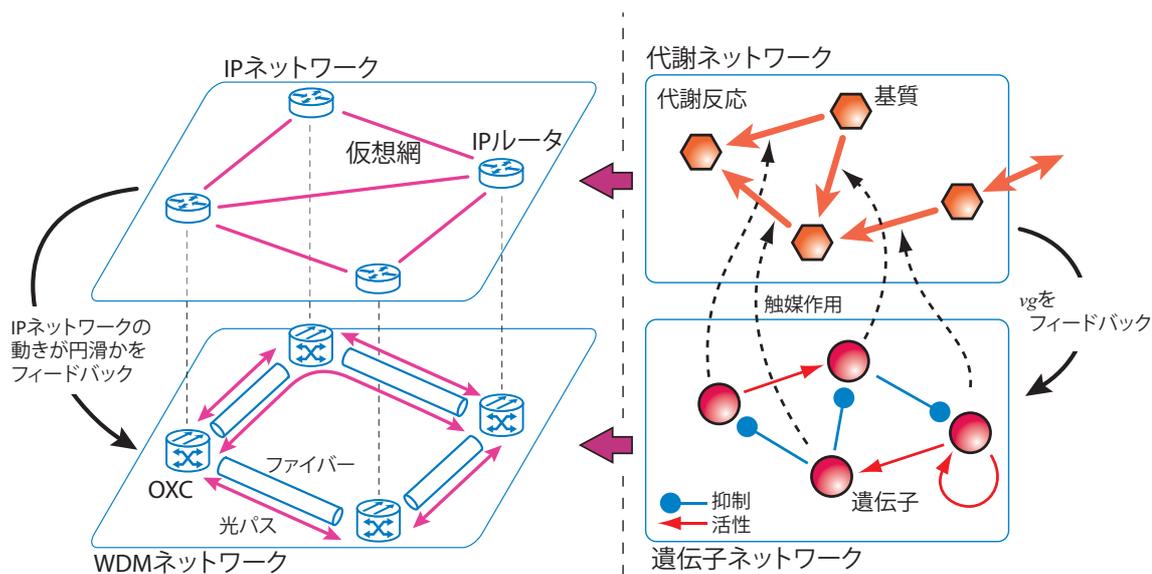


図 8: 遺伝子・代謝ネットワークと IP-over-WDM ネットワークの対応付け

4.2 アトラクター選択を用いた仮想網制御手法

4.2.1 概要

細胞内のアトラクター選択では、遺伝子ネットワークが代謝ネットワークを制御する。環境変化により、代謝ネットワークの状態が悪化、すなわち成長レートが低下した場合は、遺伝子ネットワークが代謝ネットワークを制御することで、成長レートを回復する。我々の VNT 制御の目的は、トラヒックの変動などの環境変化によって、IP ネットワークのような上位ネットワークの性能が劣化した場合に、適切に VNT を再構築して、劣化した性能を回復させることである。

そこで、図 8 に示すように、アトラクター選択モデルにおける遺伝子ネットワークを WDM ネットワークと対応づけ、代謝ネットワークを IP ネットワークに対応づける。これにより、細胞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。実際の制御の流れは図 9 となる。すなわち、以下の手順で VNT を制御する。

- 定期的に IP ネットワークのリンク利用率を計測する
- 計測したリンク負荷から成長レートを決定する。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法ではこの成長レートにより 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。成長レートの算出方法について 4.2.4 章で詳細を述べる

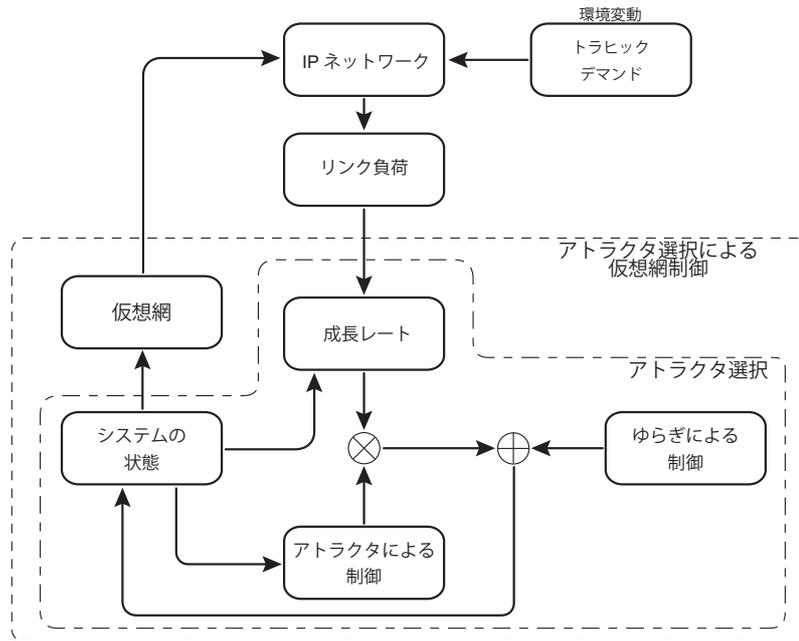


図 9: アトラクター選択を用いた仮想網制御のフローチャート

- 成長レートをもとに、アトラクター選択の確定的な振る舞い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
- 決定されたシステムの状態を元に VNT を構築する
システム状態の決定に関しては 4.2.2 章で詳細を述べる
- IP ネットワークでは、その VNT を使いトラフィックの転送を行う。VNT の構造やトラフィックデマンドの変化によりリンク利用率が変化する
- 再びリンク利用率を計測し、制御を行う

4.2.2 遺伝子発現量と光パス要求量

以降では、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法を詳細に述べる。以降の説明では、 i 、 j 、 s 、 d をノードの ID とし、ノード i を始点とし j を終点とするノードペアの ID を p_{ij} と表記する。

アトラクター選択における遺伝子を物理トポロジの各ノードペアに置く。以降でも同様に、この制御単位を遺伝子と記述する。遺伝子は、互いに活性、抑制の相互作用をおよぼしながら、発現レベルを決定する。ここでは遺伝子の発現レベルによって、ノードペアに設定

する光パスの数を決定する。このとき、発現レベルの高いノードペアにより多くの光パスを設定する。

ノードペア p_{ij} の遺伝子の発現レベル $x_{p_{ij}}$ の相互作用の関係を、式 (1) と同様に、以下の微分方程式によって定義する。

$$\frac{dx_{p_{ij}}}{dt} = v_g \cdot \left(f \left(\sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - x_{p_{ij}} \right) + \eta \quad (5)$$

ここで、 η はホワイトガウシアンノイズ、 $f(z)$ はシグモイド関数、 v_g は成長レートである。

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法の目的は、リンク利用率の最小化などの最適性ではなく、環境変化に対する適応性を実現することである。しかし、達成しうる性能を無視しているわけではなく、少なくとも、既存のヒューリスティックな制御手法と同等の性能を実現するために、 $\theta_{p_{ij}}$ をリンク利用率に応じて動的に設定することで、ノードペアに設定する光パスの数を適切にコントロールする。ノードペア p_{ij} の光パス数は、 $x_{p_{ij}}$ に応じて決定し、 $x_{p_{ij}}$ が高いノードペアには、低いノードペアより多くの光パスを設定する。光パス数の決定の詳細に関しては 4.2.5 章で述べる。ここで、式 (5) において、 $x_{p_{ij}}$ の増加、および減少は、シグモイド関数 $f(z)$ の項によって制御することができる。

$z_{p_{ij}} = \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}}$ とし、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$ を考える。シグモイド関数の曲線は、図 10 に示すように、 $z_{p_{ij}} = \theta_{p_{ij}}$ を中心とした曲線である。 $\theta_{p_{ij}}$ を小さくすると、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$ が $z_{p_{ij}}$ に関して負の方向に移動する。そのため、同じ $z_{p_{ij}}$ であっても、 $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$ が取る値が大きくなる。このとき $f(z_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}})$ は、 $x_{p_{ij}}$ の増加速度であるため、 $x_{p_{ij}}$ が大きくなる。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、 $x_{p_{ij}}$ の増加はノードペア p_{ij} の光パスを増加させる制御に相当する。逆に、 $\theta_{p_{ij}}$ を大きくすると、 $x_{p_{ij}}$ の増加速度が減少するため、結果として、光パス数を減らす制御になる。このように、 $\theta_{p_{ij}}$ を動的に設定することで、光パスの数を制御することができる。 $\theta_{p_{ij}}$ を設定する指標として、リンク上のトラヒック量を用いる。しかし、 $\theta_{p_{ij}}$ は $x_{p_{ij}}$ の変化に大きな影響を与えるため、計測したリンク上のトラヒック量を直接用いると、計測値の振動が直接 VNT 制御に反映され、VNT 制御が振動する。そこで、計測値の振動が VNT 制御に与える影響を軽減するために、平滑化計数を 0.5 とした指数移動平均をとったリンク $l_{p_{ij}}$ 上のトラヒック量 $y_{p_{ij}}$ を用いる。 $y_{p_{ij}}$ が大きいノードペアにより多くの光パスを設定するために、 $y_{p_{ij}}$ が大きいノードペアの $\theta_{p_{ij}}$ を小さくし、 $x_{p_{ij}}$ を増加させる。 $y_{p_{ij}}$ の最小値を y_{\min} 最大値を y_{\max} とし、 $\theta_{p_{ij}} = -(y_{p_{ij}} - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \times 2\theta^* + \theta^*$ とすることで $[-\theta^*, \theta^*]$ の範囲で $\theta_{p_{ij}}$ を変化させる。ただし、ノードペア p_{ij} 上にリンクが存在しない場合は、VNT を緩やかに変化させるために、 $y_{p_{ij}} = y_{\min}$ とする。

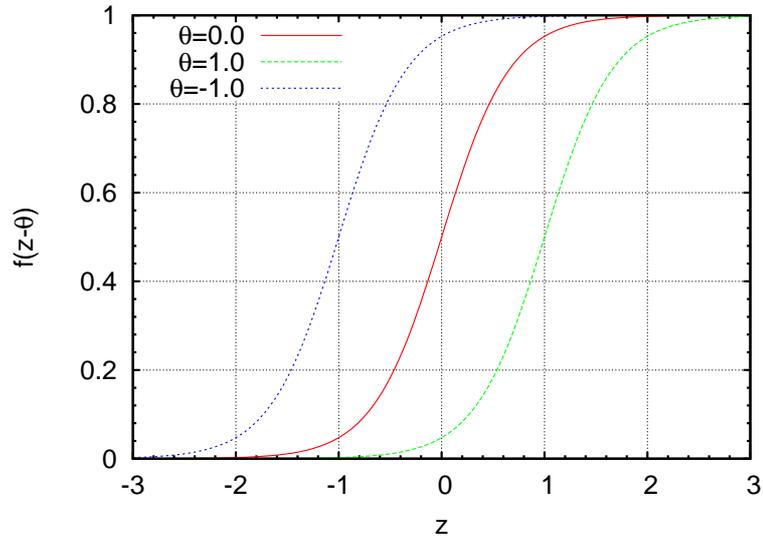


図 10: $\theta_{p_{ij}}$ とシグモイド関数の変化

4.2.3 遺伝子発現の活性・抑制を用いた光パス要求量の制御

各遺伝子は、他の遺伝子と活性・抑制の相互作用を及ぼし合いながら、 $x_{p_{ij}}$ を決定する。遺伝子 p_{sd} が遺伝子 p_{ij} を活性化することは、ノードペア p_{sd} がノードペア p_{ij} の光パス設定数を増加させることに相当し、逆に抑制することは光パス数を減少させることに相当する。そこで、光パス設定数の決定に関する以下の動機に着目し、活性と抑制の関係を定義している。

他の光パスへのトラヒックの迂回 光パスを設定する動機として他の光パスに流れているトラヒックを迂回させることが考えられる。あるノードペア p_{ij} に光パスを設定すると、その光パスの始点から終点へ流れるトラヒックは、新たに設定した光パス上を流れる。そのトラヒックが p_{ij} に光パスを設定する前に流れていた光パスの候補の1つとして、ノード i から j への物理トポロジ上での経路に相当するノードペアに設定されている光パスがある。そこで、ノード i から j への物理トポロジ上での経路上に存在するノードペアは p_{ij} を活性する

IP の経路によるリンク（光パス）の共有 IP ネットワークのある経路が、ノードペア p_{ij} と p_{sd} の光パスを経由している場合を考える。この場合、 p_{ij} 上のトラヒックの一部は、 p_{sd} 上にも流れる。そのため、 p_{ij} の光パス設定数を増加させた場合は、 p_{sd} の光パスの設定数も同時に増加させることで、トラヒックを効率的に転送することができる。これを活性化の関係によって表現する。IP ネットワークの経路はアトラクター選択を用いた VNT 制御手法によって構築された VNT によって変化するため、その経路によって制御行列を定義すると、制御

行列が計算ごとに変化し、アトラクター選択が安定しないと考えられる。そこで、IP ネットワークの経路として、物理トポロジと同じ形状とした初期トポロジ上の経路を利用する光パスによる光ファイバの共有 あるファイバを複数の光パスで共有している場合、ある光パスに割り当てる波長数を増やしたときには他の光パスの資源量を減少させる必要がある。したがって、この関係を抑制化の関係として表現する

これら活性、抑制の関係は制御行列 $W(p_{ij}, p_{sd})$ を用いて表現する。 $W(p_{ij}, p_{sd})$ は以下の通りに定義する。

$$W(p_{ij}, p_{sd}) = \begin{cases} \alpha_A & \text{if gene } p_{ij} \text{ is activated by gene } p_{sd} \\ \alpha_I & \text{if gene } p_{ij} \text{ is inhibited by gene } p_{sd} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

正の定数 α_A 、負の定数 α_I は、それぞれ、活性、抑制の関係の強さを表す定数である。各遺伝子が他の遺伝子から受ける活性と抑制の関係の総量 $z_{p_{ij}} = \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd})x_{p_{sd}}$ は、式 (5) に固有の値であり、遺伝子数とは独立した値である。これは、適切な $z_{p_{ij}}$ の範囲は、シグモイド関数 $f(z_{p_{ij}})$ によって決定されるためである。様々な環境変化に対して、適応的に動作する VNT 制御を実現するためには、式 (5) が多くの均衡点、すなわちアトラクターを持つ必要がある。この多くのアトラクターから、周囲の環境に応じたアトラクターを選択することで、環境変化に対する適応性を実現することができる。文献 [18] では、36 ノードの遺伝子ネットワークの制御行列の各要素を確率 0.03 で 1、確率 0.03 で -1 としてランダムに決定している。筆者らは、この条件のもとで、アトラクター選択モデルが環境変化に対する優れた適応性を実現することを示している。このとき、1 つの遺伝子が活性化、および、抑制化される量の平均値は、それぞれ $\sum_i^{36} 0.03 \times 1 = 1.08$ 、 $\sum_i^{36} 0.03 \times (-1) = -1.08$ となる。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法においては、ノードペア数を N 、 $W(p_{ij}, p_{sd}) = \alpha_A$ となるノードペア数を N_A 、 $W(p_{ij}, p_{sd}) = \alpha_I$ となるノードペア数を N_I とすると、1 つのノードペアが活性化、および、抑制化される量の平均値はそれぞれ、 $\alpha_A N_A / N$ 、 $\alpha_I N_I / N$ となる。したがって、これらの値が等しくなるように定数 α_A 、 α_I をそれぞれ $\alpha_A = 1.08N / N_A$ 、 $\alpha_I = -1.08N / N_I$ とし、遺伝子間の活性、抑制の強さを決定している。

4.2.4 代謝ネットワークの活性度と仮想網の活性度

IP ネットワークの状態を表す性能指標として最大リンク利用率を用い、IP ネットワークからアトラクター選択を用いた VNT 制御手法へフィードバックする成長レート v_g を決定する。 $y_{p_{ij}}$ 、 $C_{p_{ij}}$ をそれぞれリンク $l_{p_{ij}}$ 上のトラフィック量とリンク $l_{p_{ij}}$ のキャパシティ (p_{ij} の光パス数と光パスの帯域の積) とすると、 $l_{p_{ij}}$ の利用率は $u_{p_{ij}} = y_{p_{ij}} / C_{p_{ij}}$ となる。IP ネット

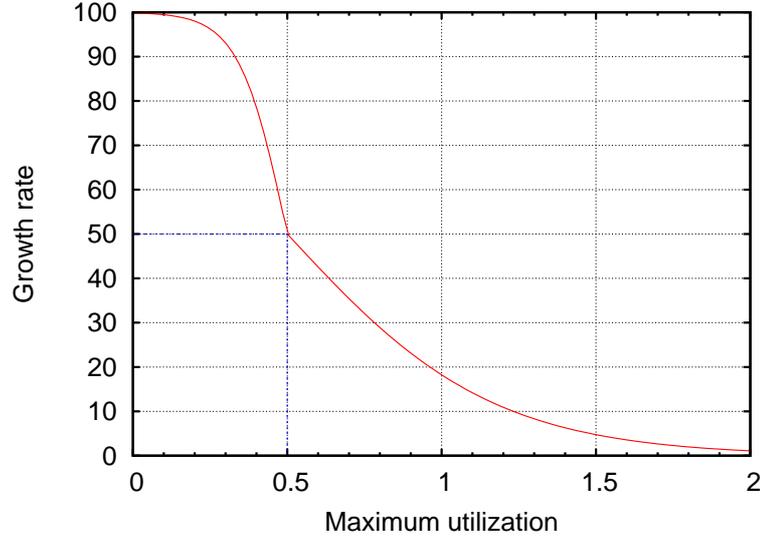


図 11: 最大リンク利用率と成長レートの関係

ネットワーク上の最大リンク利用率を $u_{\max} = \max_{p_{ij}}(u_{p_{ij}})$ とする。 u_{\max} を用いて v_g を以下の通りに定義する。

$$v_g = \begin{cases} \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{\max} - \zeta))} & \text{if } u_{\max} \geq \zeta \\ \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta' \cdot (u_{\max} - \zeta))} & \text{if } u_{\max} < \zeta \end{cases} \quad (7)$$

γ は定数であり、 v_g の値域は $[0, \gamma]$ となる。 ζ 、 δ 、 δ' も定数であり、 v_g は最大リンク利用率が ζ 以下であれば強く 1 に近づけ ζ 以上であれば 0 に近づけていく。 そのときの傾きは δ 、 δ' によって調整し、 δ 、 δ' が大きいほど傾きが急になる。 最大リンク利用率 u_{\max} が ζ より大きい場合は、 VNT の性能が悪いと見なし、 v_g を 0 に近づけ、 ゆらぎにより新たなアトラクターを探索する。 一方、 u_{\max} が ζ よりも小さくなるにつれて、 v_g を増加させ、 ゆらぎによる制御を緩和し、 アトラクターを有する制御構造による振る舞いにより VNT を制御する。 このとき、 u_{\max} が ζ に近いほど u_{\max} の変化量に対する v_g の変化量を大きくすることで、 u_{\max} が十分低い領域では安定的な制御を行い、 u_{\max} が中程度の領域では、 u_{\max} の改善を図る。 図 11 は、 $\gamma = 100$ 、 $\delta = 13$ 、 $\delta' = 3$ 、 $\zeta = 0.5$ とした際の最大リンク利用率の変化と、 その時の成長レートの変化を示した図である。

4.2.5 ポート数制約

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では各ノードペアに設置した遺伝子 p_{ij} が発現レベル $x_{p_{ij}}$ を持ち、 $x_{p_{ij}}$ に基づいてノードペア p_{ij} の光パス数 $G_{p_{ij}}$ を決定する。 ここでは、

ファイバ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数 P_T とレシーバ数 P_R がノードペア間の光パス数を制約するものとする。

ノード i に関して、そのノードのトランスミッタを利用するノードペアの $x_{p_{id}}$ の総和に対する、 $x_{p_{ij}}$ の比に応じて、 p_{ij} に利用可能な光パス数を割り当てる。レシーバでも同様に、光パス数を割り当てる。これにより $x_{p_{ij}}$ の高いノードペアに多くの光パスを割り当てることが出来る。ノードペア p_{ij} の光パス数 $G_{p_{ij}}$ は、以下の式で決定する。

$$G_{p_{ij}} = \min \left(\lfloor P_R \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_s x_{p_{sj}}} \rfloor, \lfloor P_T \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_d x_{p_{id}}} \rfloor \right) \quad (8)$$

この際、実数値から整数値へのマッピングに floor 関数を用いているため、利用可能なポートを全て使い切ることができない。そこで、 $x_{p_{ij}}$ の高いノードペアから順に、利用可能な全ポートを利用するまで 1 本ずつ光パスを追加する。

波長数に関する制約がある場合など、他の制約があった場合でも同様にして容易に光パス数を決定することが出来る。例えばファイバ上で利用可能な波長数の制約は、同じファイバを利用する他の全てのノードペアの発現レベル $x_{p_{ij}}$ の比を取ることで、満たすことが出来る。

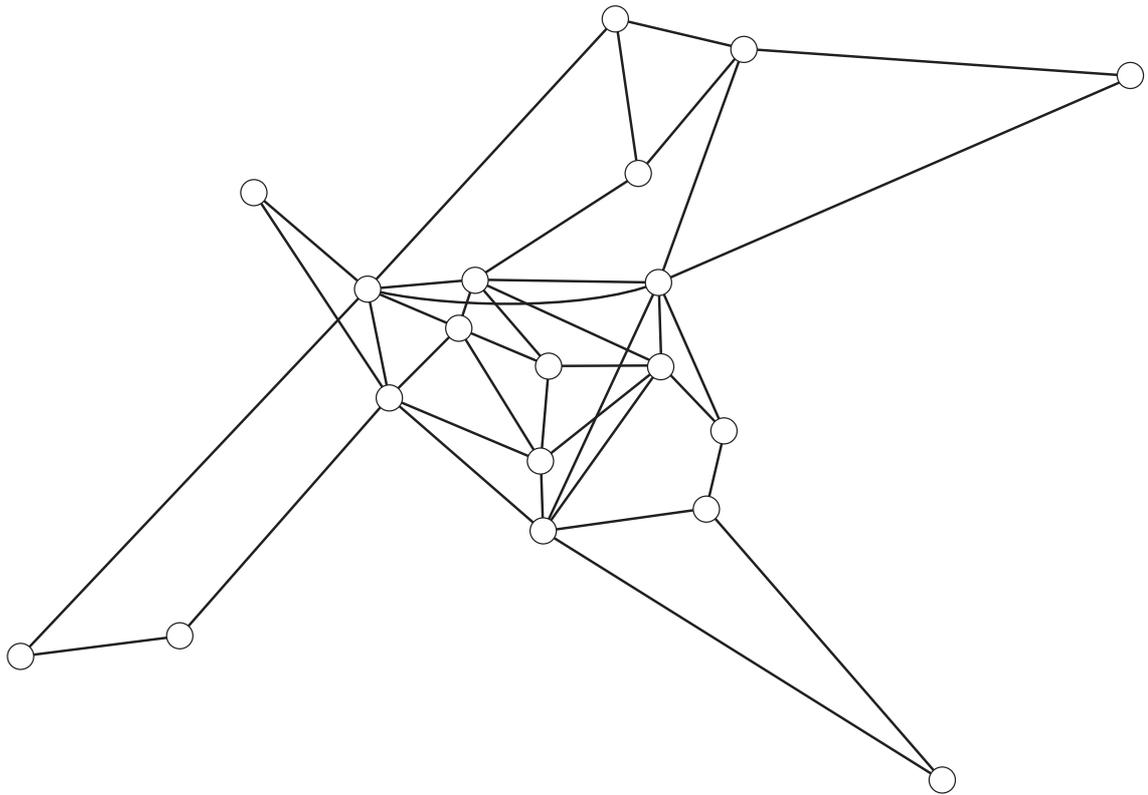


図 12: EON トポロジ

5 性能評価

本章ではアトラクター選択を用いた VNT 制御手法と、集中型の VNT 制御手法を比較する。まず評価環境について 5.1 節で述べ、次に 5.2 節で評価結果を述べる。

5.1 評価環境

5.1.1 物理トポロジ

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。物理トポロジには 19 ノード 38 ファイバの EON (European Optical Network) トポロジと、ランダムにファイバを設置した 50 ノード 100 ファイバの物理トポロジ (以降、ER トポロジと呼ぶ) を用いる。

図 12 は EON トポロジを描いたものである。ノードのトランスミッタおよびレシーバの数はすべてのノードで等しく、 d 個あるものとする。また、本報告ではファイバにおける波長多重数の制約は考えないものとし、ポート制約によってのみ VNT のリンク数の最大が定まるものとする。

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、定期的にリンク利用率を取得し VNT を制御するものとする。また、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法の制御パラメータを下記の通りに定める。まず、式 (7) の成長レートの定数を、 $\gamma = 1$ 、 $\delta = 13$ 、 $\delta' = 3$ 、 $\zeta = 0.5$ とする。最大リンク利用率 u'_{max} が $\min_{th}(= 0.18)$ 以下である場合は VNT を再構築しないものとし、さらに u'_{max} が $\max_{th}(= 0.40)$ を超えると成長レートを低下させる。すなわち、 u_{max} を $(u'_{max} - \min_{th}) / (\max_{th} - \min_{th})$ とし、式 (7) から成長レートを算出する。式 (2) における μ は 1 とし、式 (5) における η を平均 0、偏差 0.05 の正規分布に従う乱数としている。また、 $\theta_{p_{ij}}$ は固定であるとし、0.0 としている。

5.1.2 環境変化

環境変化として、IP ネットワークのトラフィックデマンドの変動を考える。本報告では、対地間のトラフィック需要 T_{ij} は一様分布に従ってランダムに変化するものとする。ただし、 $\sum_{ij} T_{ij}$ はノード数 N で一定となるように決定する。

5.1.3 評価指標

評価指標として最大リンク利用率と光パスの切替回数を用いる。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、ユーザの通信品質が劣化する。そのため、トラフィック変動による環境変化に対して、VNT の制御により最大リンク利用率を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。光パスの切替回数は、VNT の再構築時の光パスの解放および光パスの設定に必要な制御量である。具体的には、VNT V^a から VNT V^b への再構築を考えた場合に、以下の式で光パスの切替回数を定義する。

$$\sum_{ij} |V_{ij}^a - V_{ij}^b| \quad (9)$$

ただし、 V_{ij}^a (V_{ij}^b) は、VNT V^a (V^b) においてノード i とノード j 間に設定される光パス数である。光パスの切替回数が多いほど、VNT の再構築に必要な処理時間および制御量が増大する。従ってトラフィック変動に応じて再構築された VNT が、再構築以前の VNT の構成と大きく異なると、再構築中のトラフィックが享受する通信品質に甚大な影響を及ぼすことから、光パスの切替回数は低いことが望ましい。

5.1.4 比較手法

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と以下の VNT 制御手法を比較する。

集中型の VNT 制御手法

集中型の VNT 制御手法として、3.1 節で述べた MLDA、および、3.2 節で述べた WR-LDA を比較対象とする。

ランダム手法 (RANDOM)

ランダムにノードペア k を選択し、ノードペア k に光パスを設定する。残余ポート数が 0 となるまで光パスを設定する。ランダム手法は、トラヒック需要 T_{ij} を観測することなく VNT を構築する。本手法の結果とアトラクター選択を用いた VNT 制御手法を比較することにより、式 (5) における確定的な振る舞いが効果的に働くことを示す。

自律分散型 VNT 制御手法 (SELF)

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法以外の自己組織型の VNT 制御手法として、自律分散型 VNT 制御手法 (SELF) を比較対象とする。自律分散型 VNT 制御手法では、各ノード (i とする) が自律的に VNT を構築する。具体的には、以下の動作を行う。

- ノード i を始点とする光パス集合のリンク利用率を監視する
- 監視している光パスの利用率が閾値 T_H を超えると、もっとも利用率の低い光パスを解放し、異なる終端ノード間に光パスを設定する

本手法は、各ノードで自律的に光パスを設定するため、制御情報の全体共有が不要となる。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、光パスの利用率をネットワーク全体で共有する必要がある。本手法と自律分散型の VNT 制御手法を比較することで、最大リンク利用率を抑えつつ、光パスの設定回数も抑制されることを示す。

5.2 評価結果

5.2.1 制御情報量に制約がない場合

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と、集中型の VNT 制御手法の違いとして、必要とする制御情報量がある。アトラクター選択に基づく VNT 制御手法では、光パスの利用

率の情報が必要であるのに対し、集中型の VNT 制御手法では対地間のトラヒック需要が必要となる。

対地間のトラヒック需要を短期間で観測・収集を行うことは、収集が必要な情報量が多く、困難であるとの指摘もなされているが、本節ではアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の性能を評価するために、トラヒック需要が既知であると仮定した集中型の VNT 制御手法と比較する。なお、制御情報量を同一とした場合の性能比較は、5.2.2 節で議論する。

物理トポロジを ER トポロジとし、各ノードのポート数 d を 40 とした場合の光パス利用率と光パス切替数の時間推移を、図 13 および図 14 に示す。図において、横軸は制御ステップ数であり、各ステップにおいてトラヒック需要をランダムに変化させている。図中において、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法の結果を “Attractor”、また、自律分散型の VNT 制御手法を “Self” で示している。また、WR-LDA、MLDA の結果はそれぞれ “WR-LDA”、“MLDA”、さらにランダムに VNT を生成した場合の結果を “Random” で示している。図 13 を見ると、集中型の制御アプローチである MLDA、WR-LDA の最大リンク利用率が最も低く、15%程度となっている。一方、アトラクター選択に基づく VNT 制御手法の最大リンク利用率は、20%程度に抑えられており MLDA や WR-LDA とほとんど変わらないことがわかる。ランダムに VNT を生成する場合や自律分散型の VNT 制御手法では、制御情報のフィードバックがないことから、最大リンク利用率は 40%程度と高くなっている。図 14 に示した各手法の光パス切替回数を見ると、ランダムに VNT を生成する場合が最も多く、およそ 600 本となっている。集中型の制御アプローチによる光パス切替数は総じて高く、制御時に 400 本近くの光パスが切り替えられている。自律分散型の VNT 制御手法とアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の光パス切替回数は少ない。しかし、図 13 を見ると、自律型の VNT 制御手法の最大リンク利用率は改善されておらず、効果的な VNT 制御となっていないことがわかる。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、より少ない光パス切替回数で最大リンク利用率を低く抑えている。

ポート数を 20 とした場合の結果が、図 15 および図 16 である。また、物理トポロジを EON トポロジとしポート数を 10 とした場合の結果が図 17 および図 18 である。これらの結果においても、図 13 や図 14 と同様の傾向が観察される。

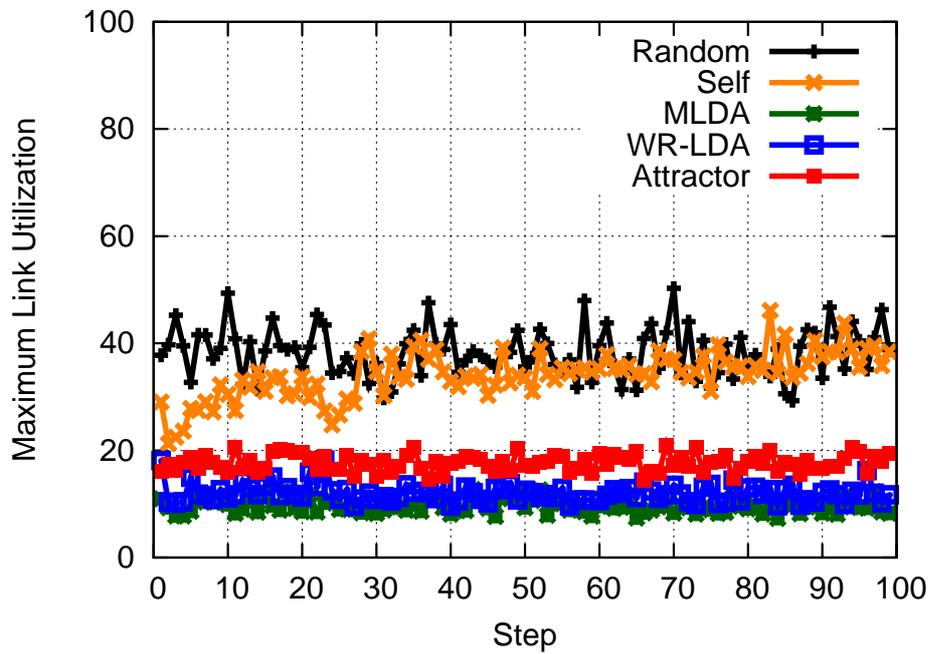


図 13: 最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$

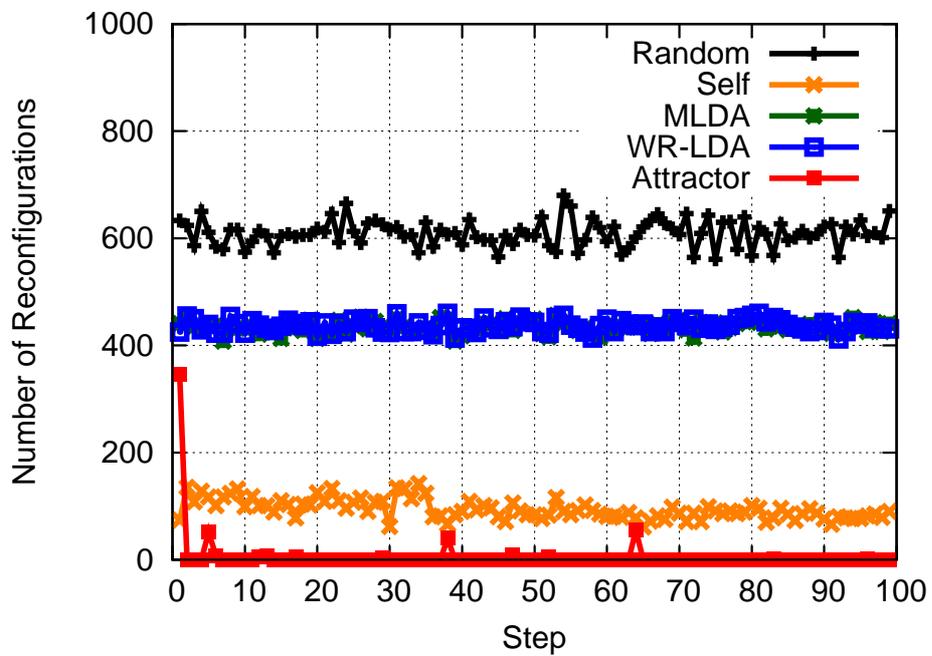


図 14: 光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$

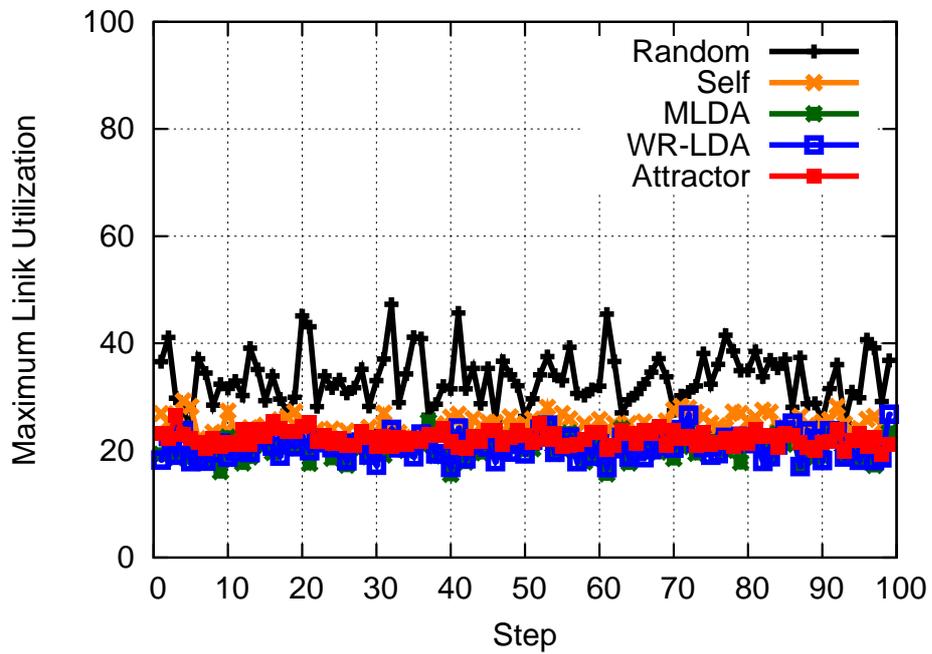


図 15: 最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$

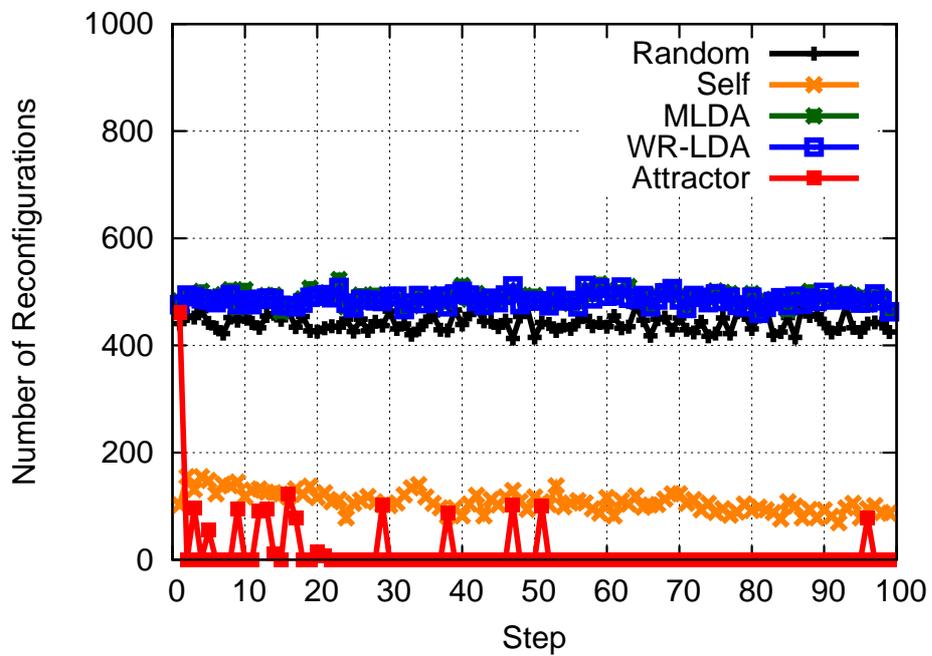


図 16: 光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$

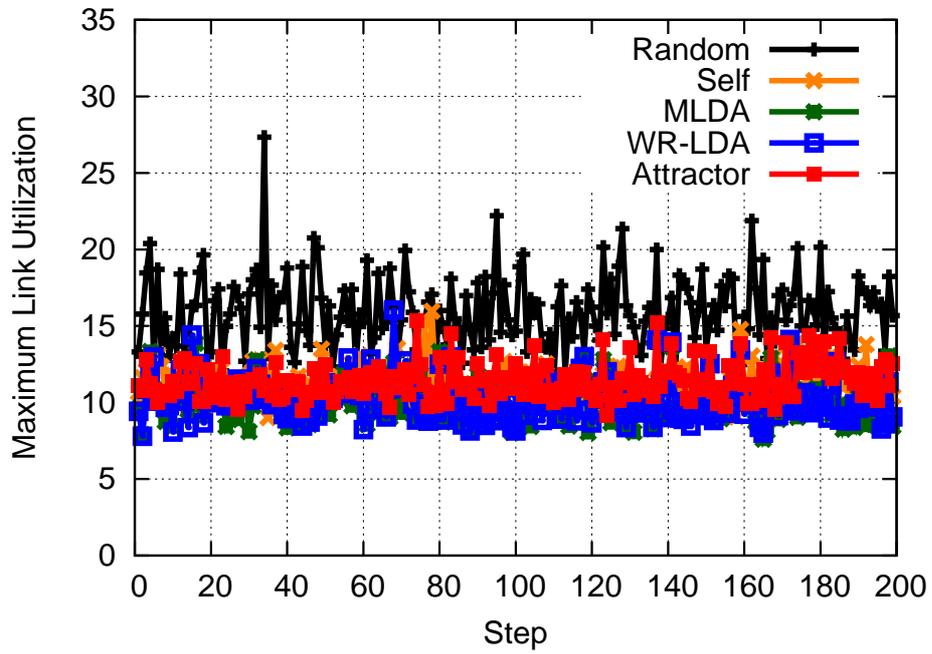


図 17: 最大リンク利用率の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$

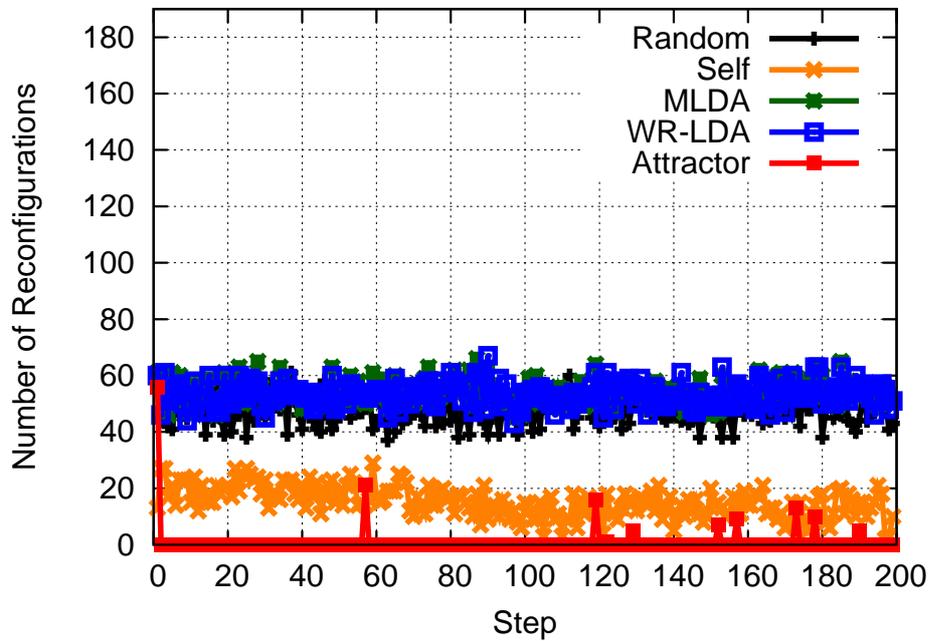


図 18: 光パス切替回数の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$

5.2.2 制御情報量を同一とする場合

前節の結果は、集中型の制御アプローチではトラヒック需要を取得可能であると仮定していた。本節では、同一の制御情報を用いる場合、すなわち、各リンクのリンク利用率のみ取得可能であるとした場合における各 VNT 制御手法の最大リンク利用率ならびに光パス切替回数を比較評価する。

集中型の制御アプローチではトラヒック行列を用いた VNT 制御を行うため、観測されたリンク利用率を用いてトラヒック行列を推定し、推定したトラヒック行列を用いて VNT を制御する。トラヒック行列の推定には、文献 [19, 20] で用いられている推定手法を用いる。この手法では VNT 上のパケットの経路情報と VNT のリンク利用率から対地間でのトラヒック需要を推定する。しかし、限られた情報から全体のトラヒック需要を推定しているため、推定したトラヒック需要と真のトラヒック需要は一致せず、推定誤差が生じる。

図 19、20 は ER トポロジにおいて $d = 40$ としてシミュレーションを行ったときの最大リンク利用率および光パス切替回数の時間推移を示したグラフである。図 19 の縦軸は最大リンク利用率、図 20 の縦軸は光パス切替回数を表しており、2 つの図ともに横軸は制御ステップ数を表している。図 19 より、集中型の制御アプローチの場合、推定したトラヒック行列と実際のトラヒック行列の間で生じる推定誤差により最大リンク利用率が高くなることがわかる。真のトラヒック需要からなるトラヒック行列を用いると仮定した場合、集中型の制御アプローチでは最大リンク利用率は 15%であったが、推定したトラヒック行列に基づいて VNT 制御を行った場合には最大リンク利用率が 60%付近となる。特に、集中型の VNT 制御手法である MLDA および WR-LDA に着目すると、多くの光パスを切り替えているにもかかわらず最大リンク利用率を低く抑えることができていない。すなわち、取得可能な制御情報量に制約があり、集中型の制御アプローチで必要となるトラヒック行列を推定する場合、推定誤差を含む制御情報により VNT が再構築される。その結果、ネットワーク性能は改善されず制御オーバーヘッドが増大する。これらの知見は、センサーネットワークを対象として自己組織化に基づく制御技術の特性を分析した文献 [17] で述べられている知見と合致している。

アトラクター選択を用いた VNT 制御手法の結果に着目すると、トラヒック行列の推定値を用いた集中型の VNT 制御手法の結果と比較して最大リンク利用率を低く抑えられている。また、図 20 の光パス切替回数を比較すると、集中型の VNT 制御手法では光パス切替回数が 400 回から 600 回であるのに対してアトラクター選択を用いた VNT 制御では 100 回以下となっている。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法は、ネットワークの状態を示すフィードバック値のみが光ネットワーク全体で共有され、光パスの再構成がフィードバック値とアトラクターを持つ制御構造に基づいて行われることから、推定誤差の影響を受けるこ

となく効果的に VNT を制御している。この傾向は、ポート数 d を 20 とした際の結果である図 21 および 22 においても観察される。

図 23 および図 24 は EON トポロジにおいて $d = 10$ とした場合の最大リンク利用率の時間推移である。この図を見ると、19 ノードの EON トポロジにおいては、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と集中型の VNT 制御手法の最大リンク利用率に有意な差がないことがわかる。これは、EON トポロジは 19 ノードと比較的小規模なトポロジであり、その結果推定誤差の影響が少なくなるためである。しかし、図 24 の光パス切替回数には、50 ノードの ER トポロジの結果と同様に有意な差が観察される。集中型制御の場合、光パスの切替回数が 60 回程度であるのに対し、アトラクター選択を用いた VNT 制御ではほとんどの制御ステップにおいて 10 回以下となっている。これらの結果から、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法は、より少ない制御情報で自己組織的に VNT を再構築する制御であると言える。

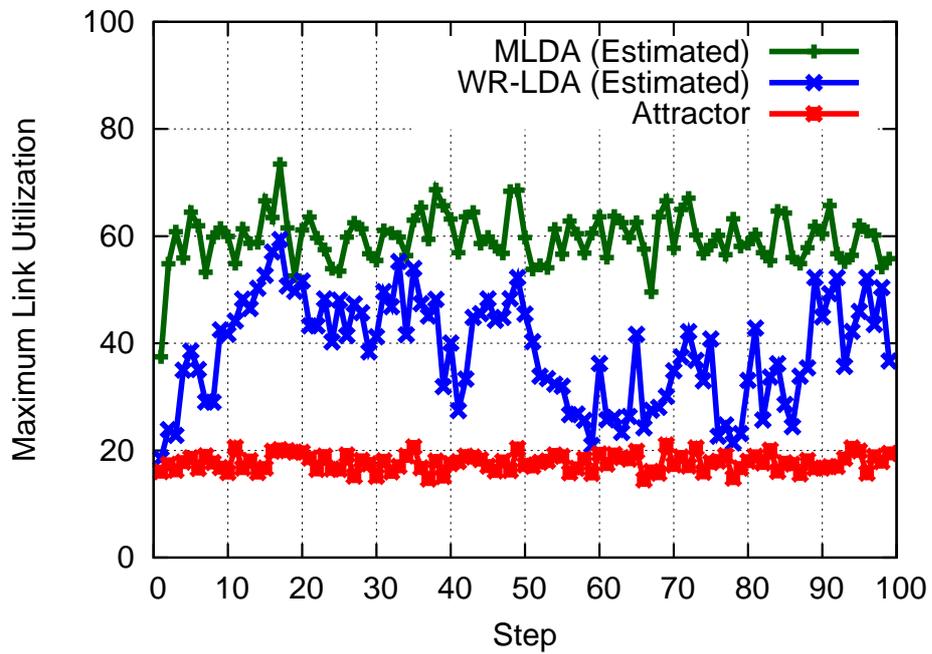


図 19: 最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$

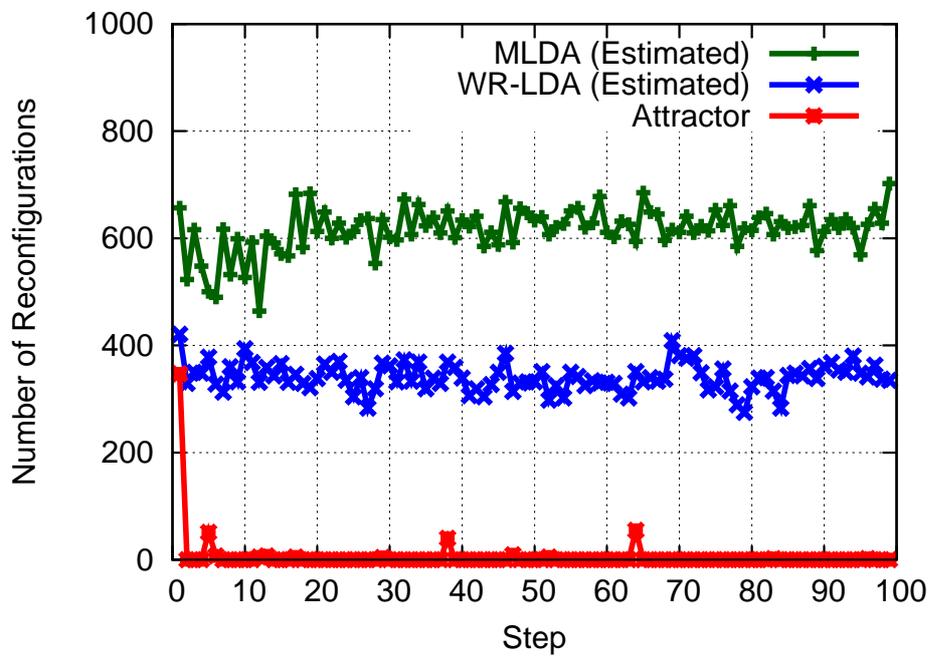


図 20: 光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 40$

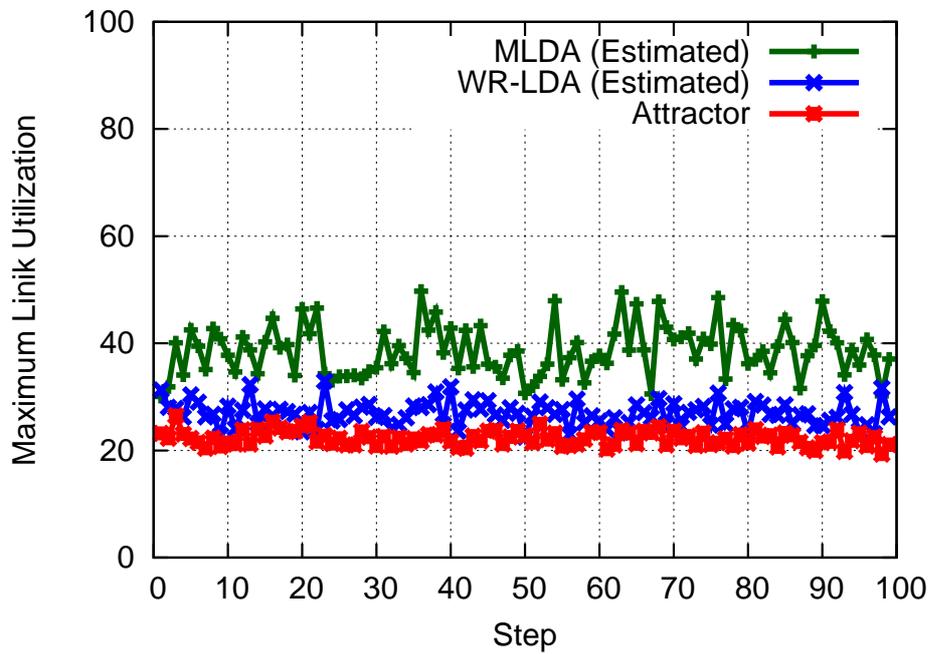


図 21: 最大リンク利用率の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$

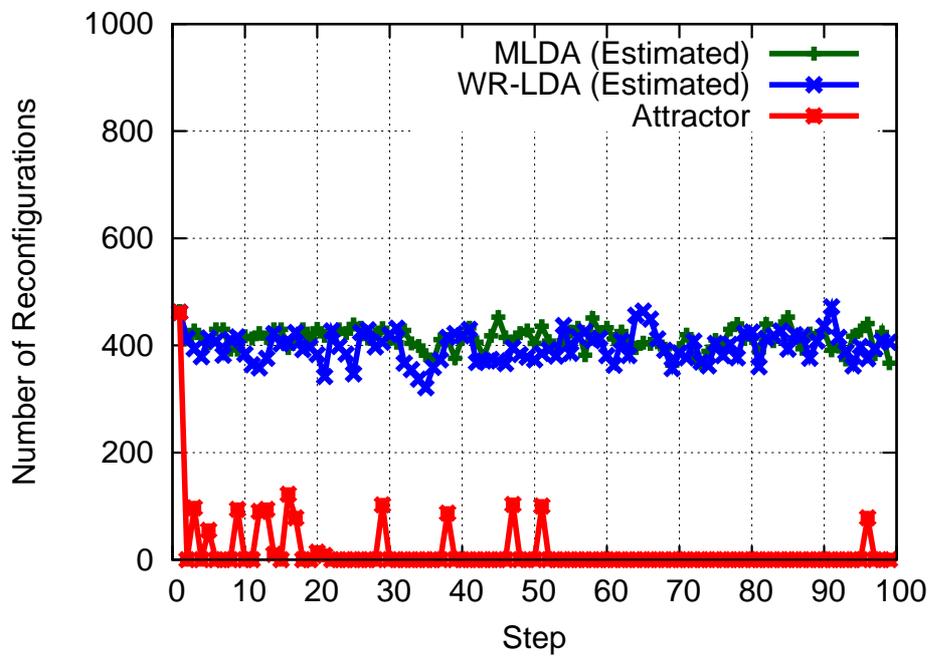


図 22: 光パス切替回数の推移 : ER トポロジ、ポート数 $d = 20$

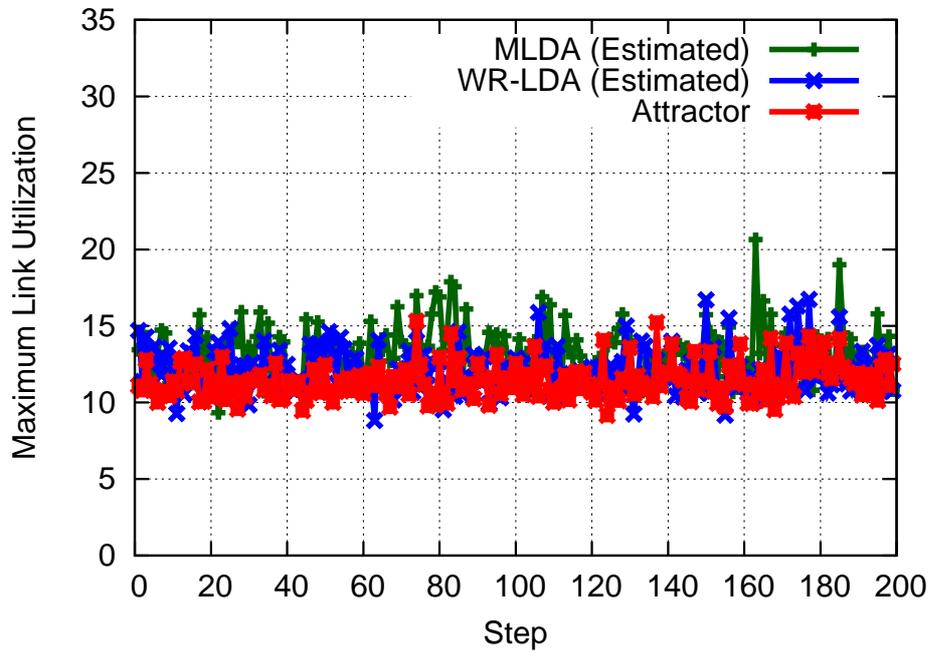


図 23: 最大リンク利用率の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$

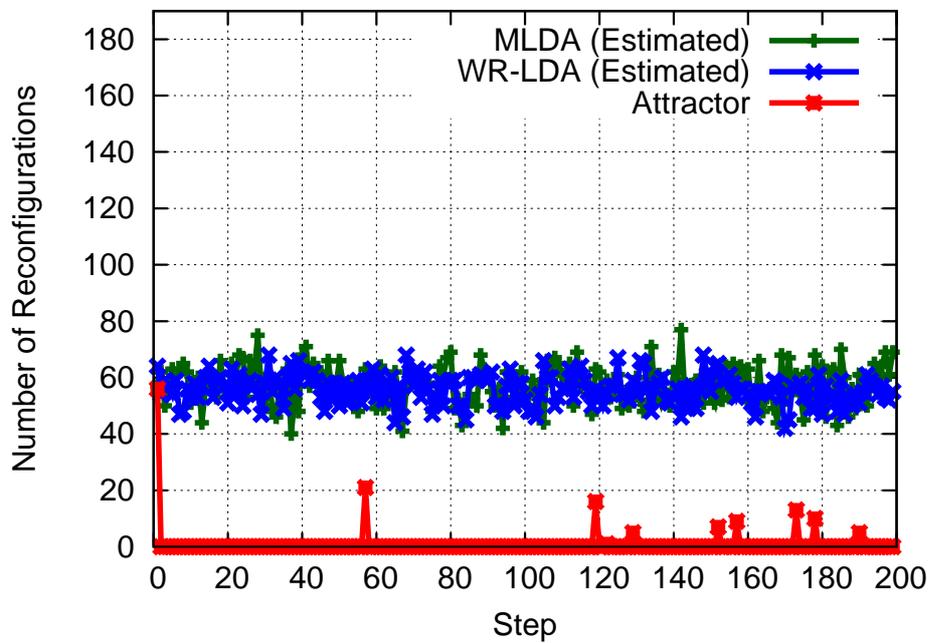


図 24: 光パス切替回数の推移 : EON トポロジ、ポート数 $d = 10$

5.2.3 トラヒック変動に時間的相関がある場合

前節まで、各制御ステップにおいてランダムにトラヒック変動を発生させ、集中型の VNT 制御手法とアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の最大リンク利用率ならびに制御オーバーヘッドである光パス切替回数を比較した。その結果、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法は、より少ない制御情報で自己組織的に VNT を再構築する制御であることがわかった。本節では、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法が、トラヒック変動に対して局所的に VNT を再構築することを明らかにする。ただし、ここで言う局所的とは、文献 [17] などのセンサーネットワークにおける地理的な局所性ではなく、制御状態の変化が局所的であることである。すなわち、トラヒック変動が少ない場合はより少ない光パス切替回数で VNT を再構築し、大きなトラヒック変動に対しては、より多くの光パス切替回数で VNT を再構築し、最大リンク利用率を抑制することを明らかにする。

トラヒック変動の時間的相関に対する光パス切替回数を示すため、以降では各制御ステップにおけるトラヒック変動を

$$T_{ij}(t+1) = T_{ij}(t) + \eta \quad (10)$$

で与える。ただし η は平均 0、分散 σ^2 のガウシアンノイズであるとする。 σ^2 を評価パラメータとして変化させることで、トラヒック変動の大きさに対する光パス切替回数を評価する。ただし上記の式において T_{ij} が負となる場合は、0 から 0.01 の一様分布により T_{ij} を定める。トラヒック変動の時間的相関は、ピアソンの積率相関係数を用いる。具体的には、制御ステップ s で生じさせる前後でのトラヒック行列 $T^-(s)$ および $T^+(s)$ に対して、 $T^+(s)$ と $T^-(s)$ (以降、制御ステップ s は表記しない) の積率相関係数を以下の式で定義する。

$$\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T_{ij}^+ - \bar{T}^+)(T_{ij}^- - \bar{T}^-)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T_{ij}^+ - \bar{T}^+)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T_{ij}^- - \bar{T}^-)^2}} \quad (11)$$

上記の式で計算される積率相関係数は、制御ステップ s で大きなトラヒック変動が生じれば 0 に近くなり、また、トラヒック変動が小さければ積率相関係数は 1 に近くなる。トラヒック変動が生じなければ積率相関係数は 1 となる。以降の評価では、 σ^2 を変化させつつ、VNT の再構築を 50 回行い、50 回の再構築のうち最後の 25 回の再構築時の光パス切替回数から再構築 1 回あたりの光パス切替回数を求めた。図 25 は EON トポロジにおいて $d = 10$ としたときのトラヒック行列の変動の大きさに対する光パス切替回数を求めた結果である。横軸はトラヒック行列の積率相関係数であり、縦軸は光パス切替回数である。なお、この図を求めるにあたって、集中型の VNT 制御手法ではトラヒック行列の真値が既知であるとしている。これは、5.2.2 節において、トラヒック行列が既知であるとした場合の光パス切替回数とトラヒック行列を推定した場合の光パス切替回数の差が小さいためである。

図 25 を見ると、トラヒック行列の相関が 1 である場合、集中型の VNT 制御の光パス切替回数は 0 となっているのに対し、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法は、わずかに光パスを切り替えている。これは、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法におけるゆらぎに起因するものである。アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、トラヒック変動の時間的相関が小さくなるとともに、光パス切替回数は徐々に増加する傾向が見受けられる。このことから、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法はトラヒック変動に対して局所的に VNT を再構築していることがわかる。一方、集中型の VNT 制御手法では、トラヒック行列の時間的相関が 1 より僅かに小さく、トラヒック需要がほとんど変化しない場合においても、光パスを大幅に切り替えることで全体最適化を図ろうとする。その結果、光パス切替回数は大幅に増加している。さらに、トラヒック変動の時間的相関が小さくなるとともに光パス切替回数は急激に増加しており、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と比較して、光パス切替回数は 10 倍となっている。この傾向は、ポート数 d を 40 とした ER トポロジにおいても観察される（図 26 参照）。以上のことから、アトラクター選択を用いた VNT 制御は、より少ない制御情報で自己組織的かつ局所的に VNT を再構築していることがわかる。

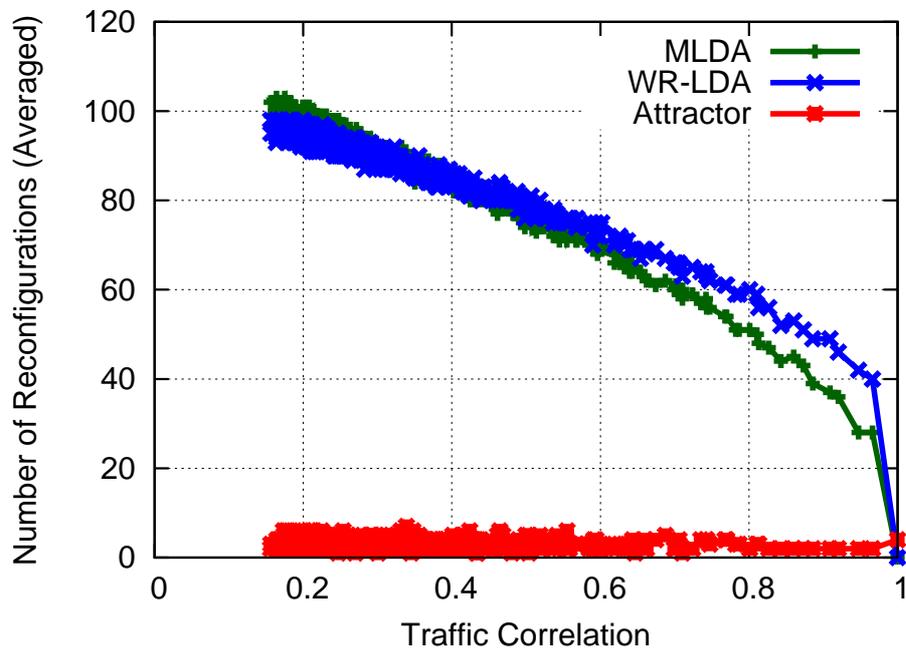


図 25: トラフィック変動の大きさと光パス切替回数の関係：EON トポロジ、ポート数 $d = 10$

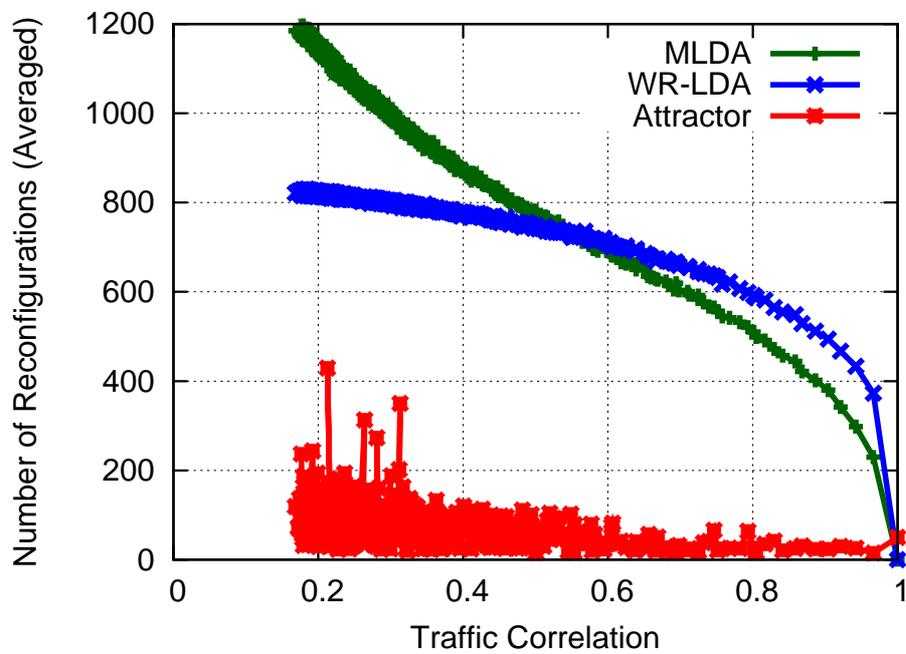


図 26: トラフィック変動の大きさと光パス切替回数の関係：ER トポロジ、ポート数 $d = 40$

6 まとめと今後の課題

本報告では、トラヒック変動への適応性を有する VNT の制御手法として、自己組織型の VNT 制御手法であるアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の制御オーバーヘッドの評価をおこなった。制御オーバーヘッドとして、VNT の再構築時の光パスの解放および光パスの設定に必要な制御量である光パスの切替回数に着目し、計算機シミュレーションにより集中型の VNT 制御手法とアトラクター選択を用いた VNT 制御手法を比較した。その結果、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、集中型の制御アプローチとほぼ同等のリンク利用率を保持しつつ、光パスの切替回数が $1/100$ 以下に削減することが明らかとなった。また、取得可能な制御情報量に制約がある場合、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法では、ネットワークの状態を示すフィードバック値のみが光ネットワーク全体で共有され、光パスの再構成がフィードバック値とアトラクターを持つ制御構造に基づいて行われることから、推定誤差の影響を受けることなく効果的に VNT を制御し、集中型の制御アプローチと比較して最大リンク利用率が半減されることを示した。さらに、集中型の VNT 制御手法では、トラヒック行列の時間的相関が 1 より僅かに小さくトラヒック需要がほとんど変化しない場合においても、光パスを大幅に切り替えることで全体最適化を試みるため、アトラクター選択を用いた VNT 制御手法と比較して光パス切替回数は大幅に増加することも明らかとなった。

本報告では、各ノードにおいて VNT のリンク利用率を取得可能であるとしていた。しかし、VNT のリンク利用率は、各ルータのインタフェースの送受信バイト数から算出されるものであり、一時的かつ急激なトラヒック変動によって誤差が生じる可能性がある。今後は、リンク利用率に誤差が含まれる場合のアトラクター選択を用いた VNT 制御手法の評価に取り組む予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、日頃より熱心に指導して下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、ならびに荒川伸一助教に厚く御礼を申し上げます。また大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授、大阪大学大学院情報科学研究科の小泉佑輝助教、ならびに大阪大学大学院経済学研究科の犬下裕一助教には適切な助言を頂き、指導して頂きました。心より御礼申し上げます。さらに本報告の作成にあたり、様々な助言を下された平山 孝弘氏、南 勇貴氏、樽谷 優弥氏をはじめとする村田研究室の方々にも御礼を申し上げます。

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, 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, 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, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [4] N. Ghani and S. Wang, “On IP-over-WDM integration,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [5] M. Kodialam and T. Lakshman, “Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 358–366, Apr. 2001.
- [6] J. Comellas, R. Martinez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, “Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks,” *IEEE Network*, vol. 17, pp. 22–27, Mar. 2003.
- [7] R. Ramaswami, K. Sivarajan, I. Center, and Y. Heights, “Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840–851, June 1996.
- [8] Z. Zhensheng and A. S. 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.
- [9] 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 IEEE INFOCOM*, pp. 57–65, June 2002.

- [10] 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.
- [11] A. Soule, A. Nucci, R. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, “Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing change,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, pp. 485–498, June 2007.
- [12] 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*, Feb. 2010.
- [13] 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, pp. 2543–2553, Mar. 2005.
- [14] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, “Stability of virtual network topology control for overlay routing services,” *OSA Journal of Optical Networking*, vol. 7, pp. 704–719, July 2008.
- [15] 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, Dec. 2010.
- [16] Y. Minami, Y. Koizumi, S. Arakawa, T. Miyamura, K. Shiimoto, and M. Murata, “Adaptive virtual network topology control in WDM-based optical networks,” in *Proceedings of INTERNET*, Sept. 2010.
- [17] Y. Kiri, M. Sugano, and M. Murata, “Robustness in sensor networks: Difference between self-organized control and centralized control,” *International Journal on Advances in Networks and Services*, vol. 2, pp. 45–52, June 2009.
- [18] C. Furusawa and K. Kaneko, “A generic mechanism for adaptive growth rate regulation,” *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [19] 大下裕一, 荒川伸一, 村田正幸, “交流トラヒック行列推定手法とネットワーク制御への応用,” *電子情報通信学会会誌*, vol. 93, pp. 293–297, Apr. 2010.

- [20] Y. Tarutani, Y. Ohsita, S. Arakawa, and M. Murata, “Estimation of traffic amounts on all links by using the information from a subset of nodes,” in *Proceedings of EMERGING 2010*, pp. 18–23, Oct. 2010.