

特別研究報告

題目

アトラクタ選択を用いた仮想網制御の性能評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

南 勇貴

平成 21 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

アトラクタ選択を用いた仮想網制御の性能評価

南 勇貴

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デマンドの変化は非常に大きくなってきている。現在トラフィックを WDM ネットワーク上に効率的に収容するための仮想網制御に関する研究が数多くなされているが、トラフィックの変化に対して適応的に仮想網を制御する仮想網制御手法が重要となってきている。本報告では、ネットワークの環境変化への適応性を目的とし考案された、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法の性能評価を行った。計算機シミュレーションによってアトラクタ選択を用いた仮想網制御手法と既存の仮想網制御手法を比較し、特に最大リンク利用率を指標としてその性能を評価した。性能評価の結果、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法では、確実に制御可能なトラフィック変動の大きさが、既存の仮想網制御手法のそれと比べ 2 倍程度となり、より大きなトラフィック変動に適応しリンク利用率を改善することが可能であることがわかった。また、リンク利用率改善に必要な制御回数は、既存の仮想網制御手法の十分の一程度となることを示した。また、物理トポロジが異なる場合においても同様の結果が得られており、アトラクタ選択を用いた仮想網制御は適応性が高いことが明らかとなった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing)、IP (Internet Protocol)、論理トポロジ設計、仮想網制御、遺伝子ネットワーク、アトラクタ選択

目次

1	はじめに	4
2	仮想網制御	7
2.1	IP-over-WDM ネットワーク	7
2.2	既存の仮想網制御手法	11
2.2.1	アダプティブ制御	11
2.2.2	MLDA	11
3	アトラクタ選択	13
3.1	アトラクタ選択の概念	13
3.2	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選択	13
3.3	アトラクタ選択の数学モデル	15
4	アトラクタ選択を用いた仮想網制御	17
4.1	概要	17
4.2	仮想網制御における相互作用	18
4.3	制御行列	20
4.4	成長レート	21
4.5	ノードペア間の光パス数	23
5	性能評価	24
5.1	評価環境	24
5.2	評価結果	26
6	まとめと今後の課題	36
	謝辞	37
	参考文献	38

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	物理トポロジ	9
4	光パスの設定例	9
5	論理トポロジ	10
6	IP-over-WDM ネットワーク	10
7	細胞内での様子	14
8	遺伝子・代謝ネットワークと WDM・IP ネットワークの対応付け	17
9	アトラクタ制御の流れ	18
10	$\theta_{p_{ij}}$ とシグモイド関数の変化	20
11	最大リンク利用率と成長レートの関係	22
12	EON トポロジ	24
13	abilene トポロジ	25
14	最大リンク利用率の時間変化	26
15	アトラクタ制御の成長レートの変化	27
16	EON トポロジにおける制御の成功率	28
17	アトラクタ制御によるリンク利用率の変化 : リンク利用率が改善される場合 と改善されない場合	29
18	EON トポロジにおける回復時間の平均値と 90 % 信頼区間	30
19	EON トポロジにおける回復時間の最大値	31
20	Abilene トポロジにおける制御の成功率	33
21	Abilene トポロジにおける回復時間の平均値と 90 % 信頼区間	34
22	Abilene トポロジにおける回復時間の最大値	35

1 はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) ネットワークは、光パスと OXC (Optical Cross-Connect) から構成されるネットワークであり、波長ルーティングを用いて仮想的なトポロジ (仮想網) を構築することで IP (Internet Protocol) トラフィックを収容する。近年、トラフィックを WDM ネットワーク上に効率的に収容するための仮想網制御に関する研究が数多くなされている [1-8]。例えば、文献 [8] では、ノード間のトラフィック量 (以降、トラフィックデマンドマトリクスと呼ぶ) を事前に計測することで取得し、そのノード間のトラフィックを効率良く収容するために、仮想網におけるリンク利用率の最小化を目指した仮想網設計手法が提案されている。

しかし、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デマンドの変化が大きくなることが指摘されている [9],[10]。文献 [9] 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、トラフィックデマンドなどのネットワークの状態が大きいかつ不規則に変化することが示されている。トラフィックデマンドの変化が大きい場合、長期的な計測によりトラフィックデマンドマトリクスを取得し仮想網を設計する手法では、トラフィックを効率良く収容することはできない。そのため、トラフィックデマンドの変化に対して適応的に仮想網を制御する仮想網制御手法が必要である。

トラフィックデマンドの変化に適応し、トラフィックを効率的に仮想網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、事前に取得した複数のトラフィックデマンドマトリクス、もしくは、トラフィックデマンドの変化の予測に基づき、それらのトラフィックデマンドを収容することができる仮想網を静的に構築するアプローチ (オフライン型制御) である [11]。このアプローチでは、トラフィックデマンドの変化は既知であるとして、変化後のトラフィックデマンドマトリクスは仮想網を構築する前に利用可能である、もしくは、トラフィックデマンドの変化は予測可能であると仮定している。そのため、仮想網はある特定のトラフィックデマンドマトリクスの集合に対して最適化されており、想定外のトラフィックデマンドの変動に対応することはできない。

一方、定期的なネットワークの計測、および、仮想網上の性能劣化の検出にもとづき仮想網を動的に再構成する方式 (オンライン型制御) が考えられている [12]。このアプローチでは、オフライン型制御とは異なり、変動したトラフィックに応じて仮想網を再構成することで、トラフィックデマンドの変動に適応することができる。

しかし既存のオンライン型仮想網制御の多くは、周期的かつ緩やかなトラフィックデマンドの変動を仮定しており、文献 [9],[10] で指摘されている現象が生じると、仮想網上のトラフィックデマンドの変動がより大きくかつ予測困難な変化をするため、様々なトラフィックの変動に

適応できる仮想網制御の開発が必要である。このような急激なトラヒックデマンドの変化にも適応出来る仮想網制御を実現するために、現在オンライン型制御の一つとして、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法が研究されている（以下、アトラクタ制御と呼ぶ）。

アトラクタ制御では既存の最適化手法やヒューリスティックな手法で用いられている、ルールベースの方法ではなく、ノンルールベースな方法を用いている。既存のルールベースの方法とは異なり、ノンルールベースな方法を用いることで環境の変化に対して頑強な仮想網制御を実現している。アトラクタ制御は環境変化に対する適応性を備えた生物振る舞いに着目しており、文献 [13] で示されるような生物が未知の環境変化に適応し生物の状態を回復する振る舞いをモデル化したアトラクタ選択を応用している。

アトラクタ選択の基礎となる概念は、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つの振る舞いがシステム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。既存のルールベースな方法である、ヒューリスティックな方法や最適化による方法では、想定外の環境変化に適応できないのに対して、アトラクタ選択はゆらぎによって駆動するため、未知の環境変化に対して適応する能力がある。生物システムにおけるアトラクタ選択では、環境の変化を遺伝子に伝達するシステムをもたずにその変化に対して適応する。アトラクタ制御では特徴を利用し、トラヒックデマンドマトリックスを用いずに、トラヒックデマンドマトリックスよりも情報量が少ないものの、SNMP (Simple Network Management Protocol) により直接取得可能なリンク利用率のみを用いて仮想網を制御し、環境変化に対してより早く反応し適応することができる仮想網制御を実現している。

文献 [14] では、アトラクタ制御を用いることで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適応的に動作することが示されている。しかし、そこではいくつかのシミュレーション条件での評価にとどまっており、アトラクタ選択を用いた仮想網制御を広く適用するためには、どの程度のネットワーク環境の変化に対応できるのか、また、どの程度の規模のトポロジーに対して適用できるのかを明らかにする必要がある。本報告では、WDM ネットワークにおける仮想網制御にアトラクタ制御を適用した際の性能を、様々な条件で評価する。計算機シミュレーションによる評価の結果、アトラクタ制御を用いた仮想網制御は、既存の制御手法と比較して、より大きいトラヒック変化に対してもリンク利用率を改善するとともに、リンク利用率改善に必要な制御時間も少なくなることが明らかとなった。

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 WDM ネットワークについて詳しく述べるとともに、WDM ネットワークを対象とした既存の仮想網制御手法を説明する。3章では、遺伝子と代謝ネットワークにおけるアトラクタ選択について説明し、4章でアトラクタ選択を用いた仮想網制御についての詳細を述べる。5章で性能評価で用いるネットワーク環境とシミュレーション結果に関して述べる。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。

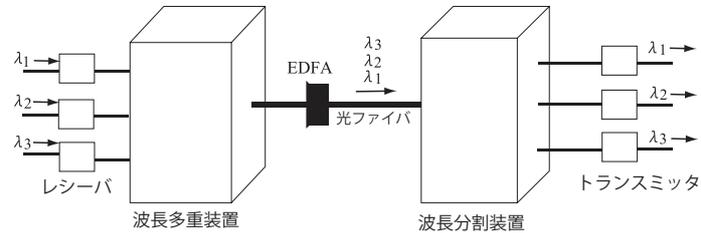


図 1: WDM 伝送システム

2 仮想網制御

本章では、本報告で対象とする仮想網を実現する WDM ネットワークと仮想網制御の必要性を述べる。次に、仮想網制御に関する既存手法について説明する。

2.1 IP-over-WDM ネットワーク

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。現状の IP-over-WDM 技術では、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。この場合、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可能性は大きい。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

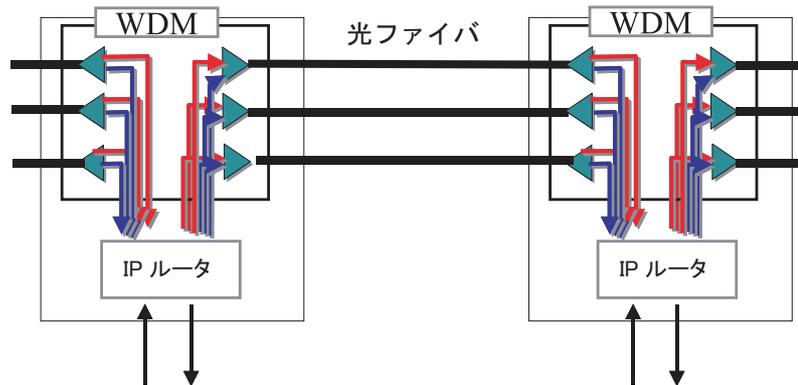


図 2: IP-over-WDM : ポイントポイント間通信

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論理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 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トポロジを論理トポロジと呼ぶ。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、本研究で想定する IP-over-WDM ネットワークの図である。図 6 に示すように、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 と光ファイバーから成る。IP ネットワークでは仮想網制御により、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仮想網の構造が決定される。

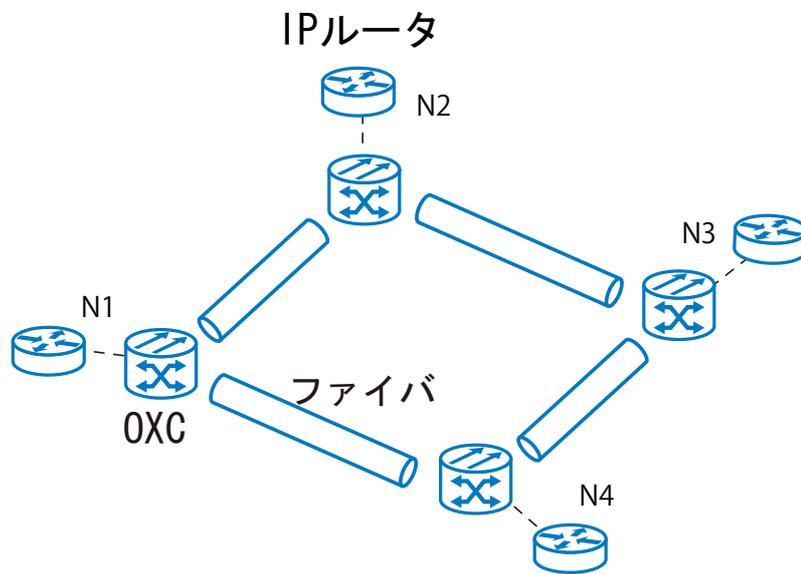


図 3: 物理トポロジ

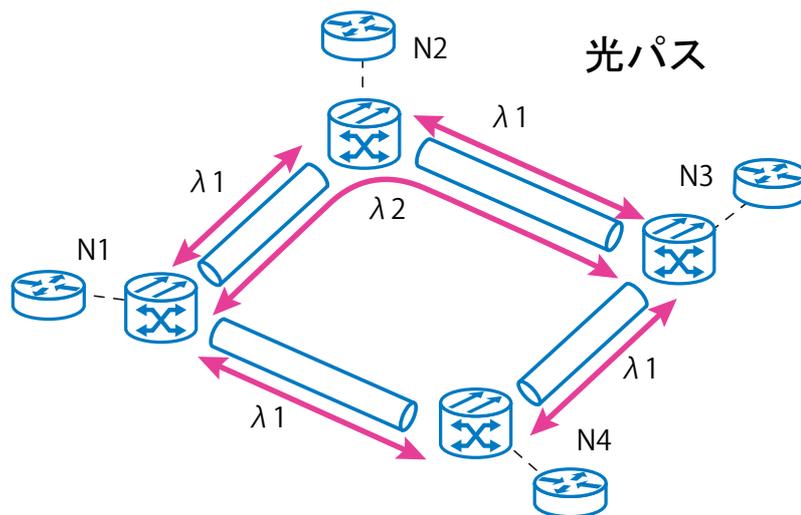


図 4: 光パスの設定例

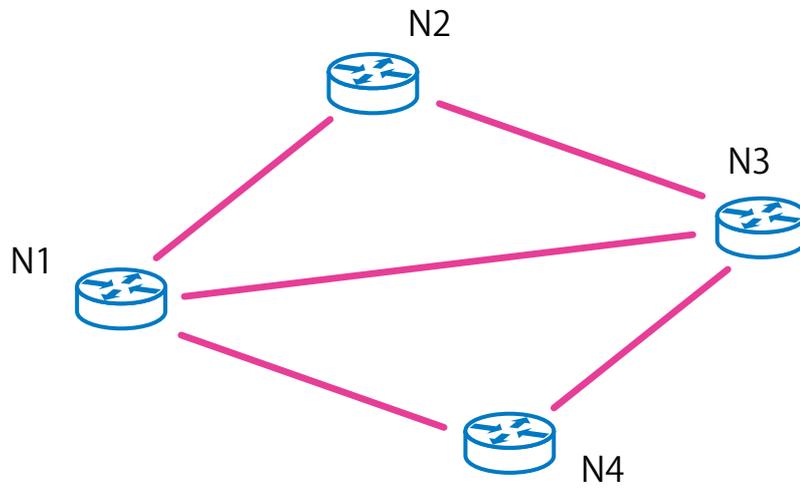


図 5: 論理トポロジ

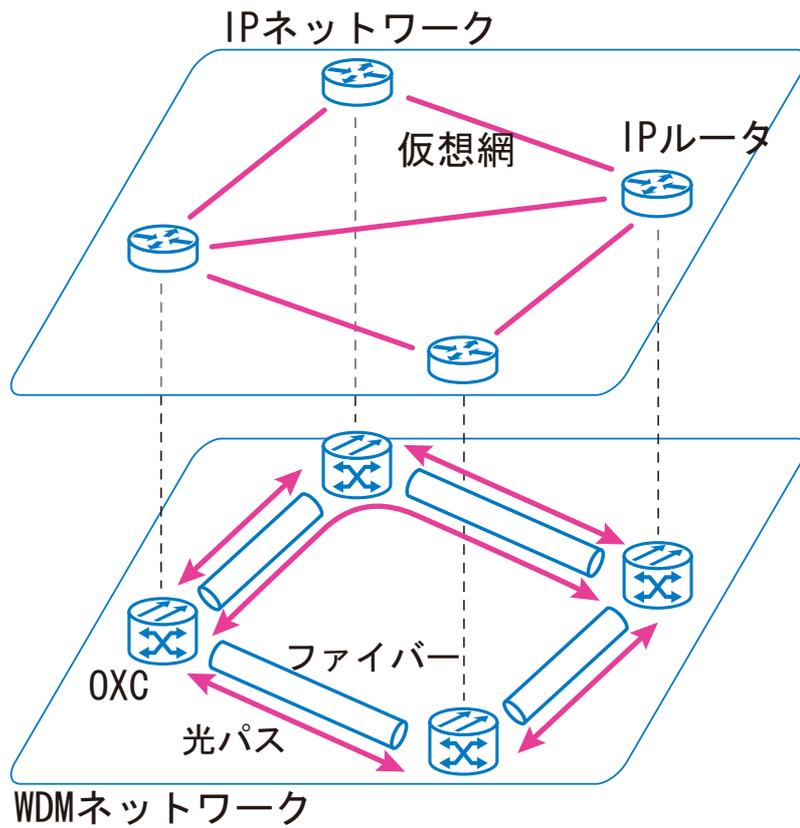


図 6: IP-over-WDM ネットワーク

2.2 既存の仮想網制御手法

ここでは過去に研究された仮想網制御手法として、アダプティブ制御と MLDA の 2 つを取り上げ説明する。

2.2.1 アダプティブ制御

アダプティブ制御とは文献 [12] で書かれている、適応性を目的としたヒューリスティックな仮想網制御手法である。本報告では、アトラクタ制御との性能比較対象としてこのアダプティブ制御を用いた。

アダプティブ制御ではネットワークのリンク利用率の許容範囲の上限 W_H と下限 W_L を設定し、計測したリンク利用率が許容範囲外であった場合、仮想網の変更を行う。ネットワークのリンク利用率は定期的に計測され、リンク利用率とそれを用いて推定されたトラフィックデマンドマトリクスを基に制御を行う。またパスの設定は 1 回の制御で 1 本ずつ行われる。制御の流れは以下のようになる。

Step1 リンク利用率を計測し、最大リンク利用率と最小リンク利用率を求める

Step2 あるノードペア間のトラフィックが 0 より大きく、光パスを持たないならば、光パスを設定する。トラフィックが 0 より大きい全てのノードペアに既に光パスが設定されていれば Step3 の処理に移る

Step3 計測した最大リンク利用率が W_H を超えている場合、最大リンク利用率を示すリンクを経路として持つノードペアの中で最もトラフィックの大きいペアに新たな光パスを追加する。最大リンク利用率が W_H を超えていなかった場合は Step4 の処理に移る

Step4 最小リンク利用率が W_L を下回っている場合、最小リンク利用率を示すリンクを経路として持つノードペアの中でも最もトラフィックが小さいペアの光パスを削除し制御を終了する。ただしそのパスがノードペアを結ぶ唯一のパスである場合は次にトラフィックの小さいペアに同様の処理を行う

以上のようにしてアダプティブ制御は仮想網を構築する。

2.2.2 MLDA

MLDA は文献 [8] で書かれているヒューリスティックな仮想網制御手法であるが、アダプティブ制御とは違い性能の最適化を目的としている。

MLDA ではトラフィックデマンドマトリクスを直接取得出来るものとし、そのトラフィックデマンドマトリクスを用いて制御を行う。制御の流れは以下のようになる。

Step1 ネットワークからトラフィックデマンドマトリクスを取得する

Step2 トラフィックデマンドマトリクスよりトラフィックの大きいノードペアを降順に1つ取得し、Step2に移る。トラフィックが0でない全てのノードペアに関して処理が終了していればStep4へと移行する

Step3 Step2で取得したノードペアに光パスを設定する。光パスには利用可能で最も使用率の低い波長を用い、最もホップ数の少ない経路を利用する。もしポート数、波長数の制約より新たな光パスを設定出来ない場合は光パスを設定せずにStep2の処理に戻る

Step4 もし更に光パスを設定出来るならば、まずランダムにノードペアを選ぶ。そのノードペアに新たに光パスを設定することが可能でありノードペア間の最短経路上に利用可能な波長が存在する場合、新たに光パスを設定する

以上のようにしてMLDAは仮想網を構築する。

3 アトラクタ選択

本章では、アトラクタ制御において重要なアトラクタ選択について説明する。

3.1 アトラクタ選択の概念

アトラクタ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、アトラクタ選択は、アトラクタをも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。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選択について述べる。

3.2 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選択

本報告では、文献 [13] 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選択に注目する。図 7 に、文献 [13] の細胞の例を示す。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

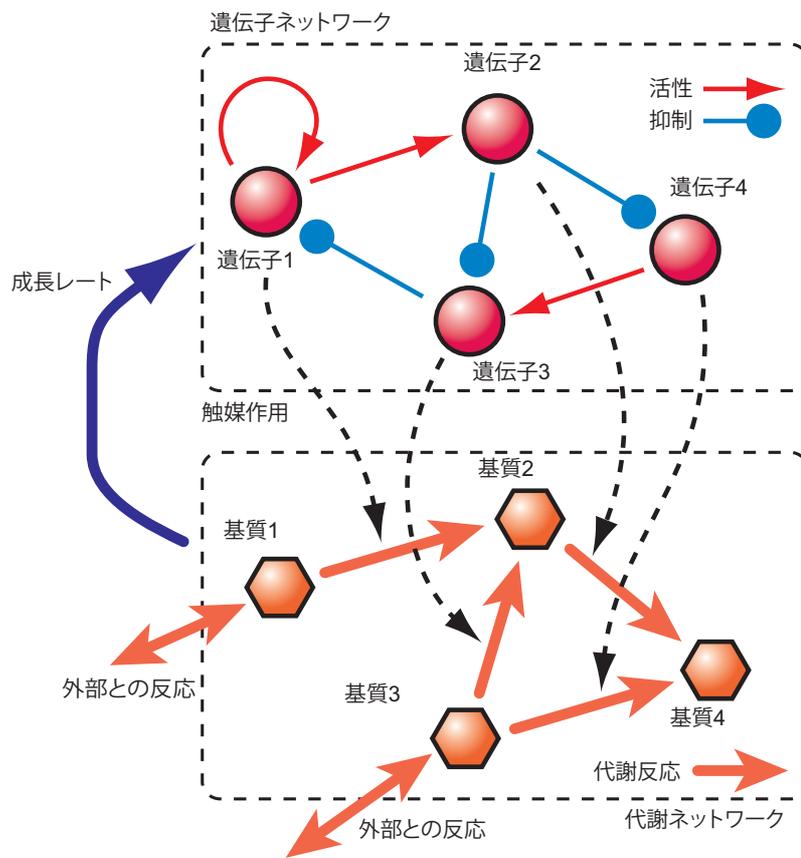


図 7: 細胞内での様子

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、すなわち活性度として利用し、アトラクタ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、アトラクタに安定的に収束する。

次章では、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選択の数学モデルについて述べる。

3.3 アトラクタ選択の数学モデル

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 [13] 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移動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、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、細胞はアトラクタを持つ制御構造により、安定的にアトラクタに収束する。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。

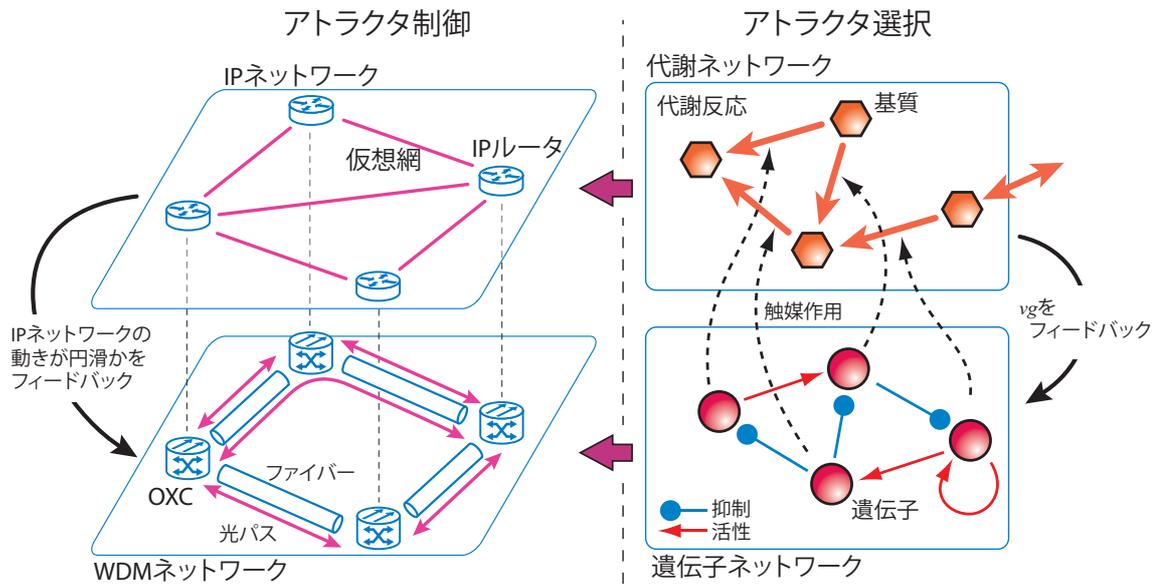


図 8: 遺伝子・代謝ネットワークと WDM・IP ネットワークの対応付け

4 アトラクタ選択を用いた仮想網制御

本章では、アトラクタ選択を用いた仮想網制御について説明する。

4.1 概要

細胞内のアトラクタ選択では、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。我々の仮想網制御の目的は、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、適切に仮想網を再構築して、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選択と同様に、アトラクタ制御は 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 のようになる。

- 定期的に IP ネットワークのリンク負荷を計測する

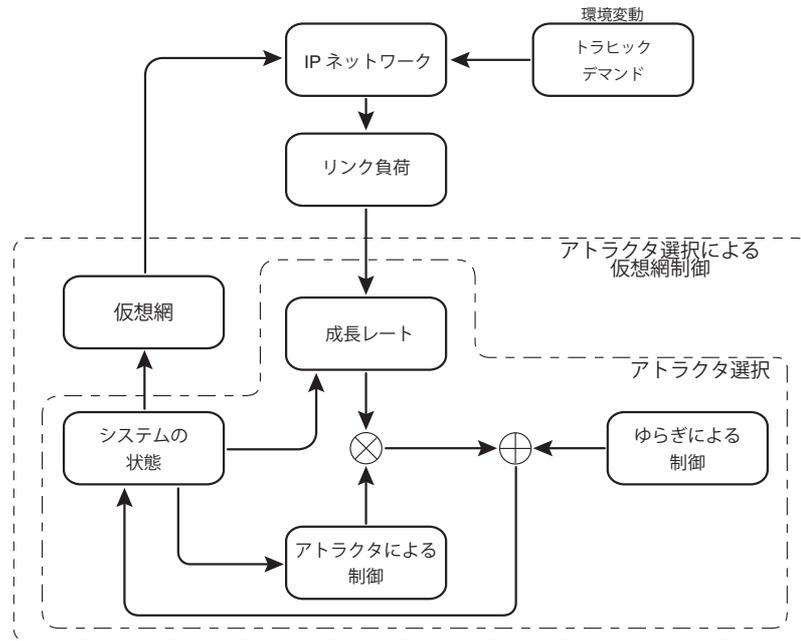


図 9: アトラクタ制御の流れ

- 計測したリンク負荷から成長レートを決定する。アトラクタ制御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
アトラクタ制御における成長レートに関しては 4.4 章で詳細を述べる
- 成長レートをもとに、アトラクタ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仮想網を構築する
システム状態の決定に関しては 4.2 章で詳細を述べる
- IP ネットワークでは、その仮想網を使いトラフィックの転送を行う。仮想網の構造やトラフィックデマンドの変化によりリンク負荷が変化する
- 再びリンク負荷を計測し、制御を行う

4.2 仮想網制御における相互作用

以降では、アトラクタ選択にもとづく仮想網制御手法を詳細に述べる。以降の説明では、 i 、 j 、 s 、 d をノードのインデックス 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。

アトラクタ制御の目的は、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、 $\theta_{p_{ij}}$ をリンク負荷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 4.5 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。仮想網制御では、 $x_{p_{ij}}$ 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仮想網制御に反映され、仮想網制御が振動する。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、仮想網を緩やかに変化させるために、 $y_{p_{ij}} = y_{\min}$ とする。

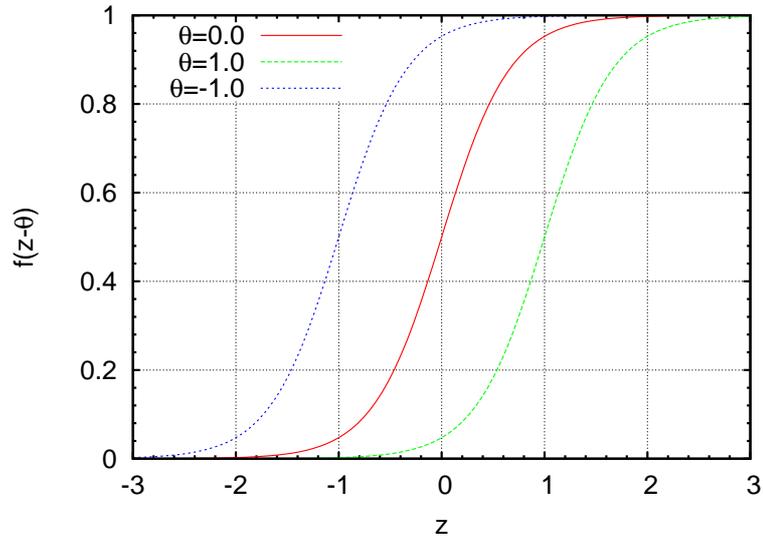


図 10: $\theta_{p_{ij}}$ とシグモイド関数の変化

4.3 制御行列

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制御によっ

て構築された仮想網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、適応的に動作する仮想網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を持つ必要がある。この多くのアトラクタから、周囲の環境に応じたアトラクタを選択することで、環境変化に対する適応性を実現することができる。文献 [13] 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。アトラクタ選択による仮想網制御においては、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。

4.4 成長レート

最適化を目指す IP ネットワークの指標として最大リンク利用率を用い、IP ネットワークからアトラクタ制御へフィードバックする成長レート v_g を決定する。図 11 は最大リンク利

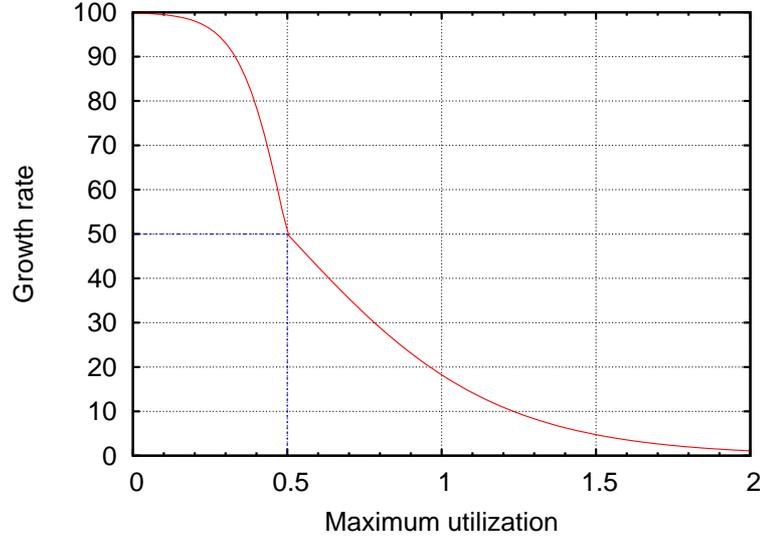


図 11: 最大リンク利用率と成長レートの関係

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。

$y_{p_{ij}}$ 、 $C_{p_{ij}}$ 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 100 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、仮想網の性能が悪いと見なし、 v_g を 0 に近づけ、ゆらぎによりアトラクタ制御は新たなアトラクタを探索する。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、式における確定的な制御項が仮想網制御をコントロールし、アトラクタに収束するように制御を行う。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。

4.5 ノードペア間の光パス数

アトラクタ選択を用いた仮想網制御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にはできない。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。

また、他の制約があった場合、例えば波長数に関する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。

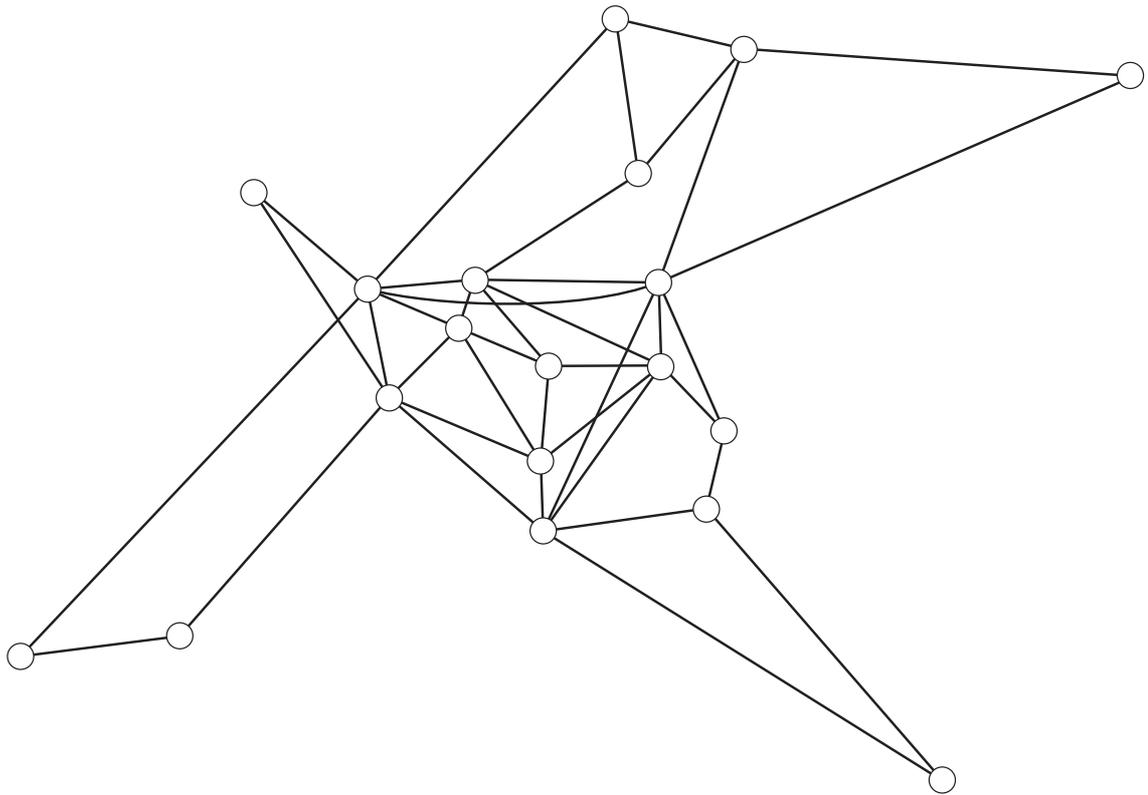


図 12: EON トポロジ

5 性能評価

本章ではアトラクタ制御と他の制御手法との性能評価の環境と、性能評価の結果を述べる。

5.1 評価環境

各制御手法の性能をシミュレーションプログラムを用いて評価した。物理トポロジには 19 ノード 38 リンクの EON (European Optical Network) トポロジと、11 ノード 14 リンクの abilene トポロジの 2 つのトポロジを用いた。図 12、図 5.1 は各トポロジを描いたものである。各ノードにはトランスミッタおよびレシーバが 8 子あるものとし、本報告ではファイバにおける波長多重数については考えないものとする。

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。本評価では、現実のトラフィックデマンドを用いた際の性能を評価するのではなく、トラフィックデマンドの変動の大きさに対するアトラクタ制御を用いた仮想網制御の性能を評価するため、トラフィック変動は時刻 500 でのみ起こり、それ以外の時刻ではトラフィックデマンドは変化しないもの

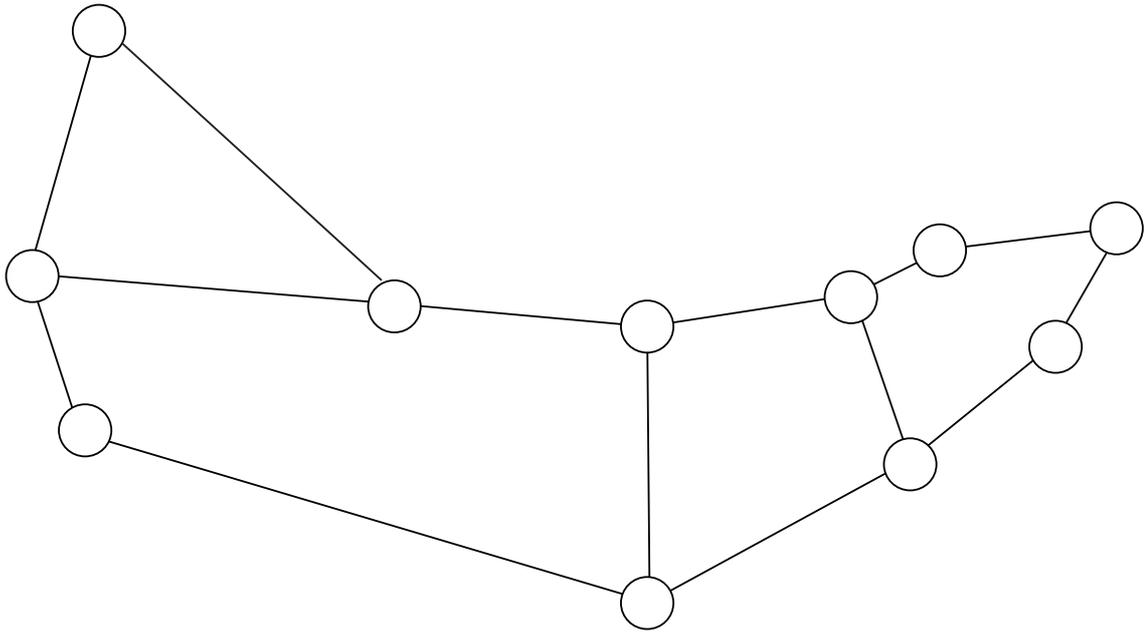


図 13: abilene トポロジ

とする。各ノードペアのトラフィックデマンド $d_{p_{ij}}$ は平均 1、分散 σ^2 の対数正規分布に従い、 $\sum_{p_{ij}} d_{p_{ij}}$ が一定となるように決定する。

アトラクタ制御は SNMP により 5 分に 1 回リンク利用率を取得し仮想網を制御するものとし、式 (7) の成長レートの定数を、 $\gamma = 100$ 、 $\delta = 13$ 、 $\delta' = 3$ 、 $\zeta = 0.5$ (図 11) とする。式 (2) における μ を 1 とし、式 (5) における η を平均 0、偏差 0.2 の正規分布に従う乱数としている。また、 $\theta_{p_{ij}}$ の変化する範囲である θ^* を 2.0 とする。性能比較対象には、適応性を目的としたヒューリスティックな手法として 2.2.1 章で述べたアダプティブ制御を用いる。アダプティブ制御では、5 分に 1 回リンク利用率を取得し、リンク利用率より tomogravity 法 (文献 [15]) を用いてトラフィックデマンドマトリックスを推定し、リンク利用率とトラフィックデマンドマトリックスを用いて仮想網の再構築を行うものとし、 $W_H = 0.5$ 、 $W_L = 0.1$ とする。

図 14 は、物理トポロジを EON トポロジ、 $\sigma^2 = 2.0$ とし、時刻 0 においてトラフィックの初期値を決定し、時刻 500 においてトラフィック変動が生じたときの各時刻における最大リンク利用率を示している。また図 15 はその時のアトラクタ制御の成長レートの変化を示している。図においてアトラクタ制御による仮想網制御を適用したときの結果は “Attractor” であり、アダプティブ制御による仮想網制御を適用したときの結果が “Adaptive” である。いずれの制御手法においても、時刻 0 における制御の開始とともに最大リンク利用率が低下す

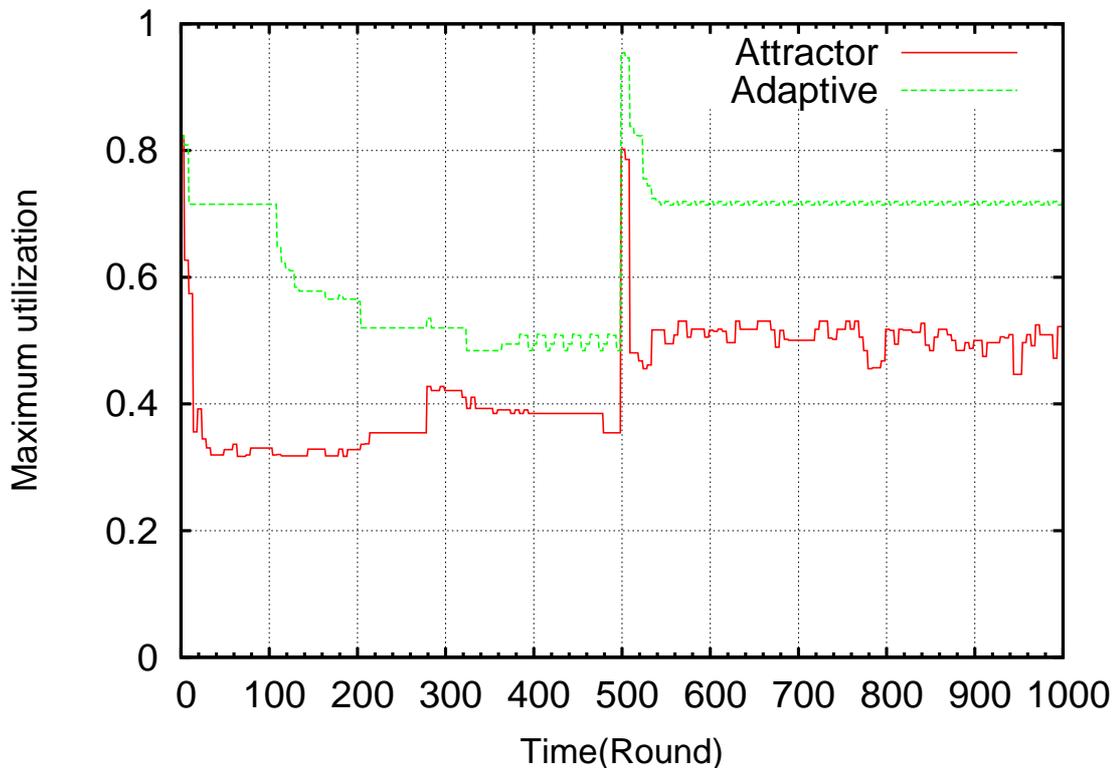


図 14: 最大リンク利用率の時間変化

る。また、時刻 500 でトラヒック変動が生じると、最大リンク利用率が一時的に増加するものの、時刻経過とともに最大リンク利用率が低下することが分かる。

このように、様々な条件でシミュレーションを実行した時の最大リンク利用率の変化により仮想網制御の性能を評価する。

5.2 評価結果

まず、物理トポロジを EON トポロジを用いた際のアトラクタ制御による仮想網制御の性能評価を行う。 σ^2 を 0 から 2.4 の範囲で 0.1 刻みで変化させ、各分散値に対して乱数を変化させて 100 回のシミュレーションを実行した。

図 16 は、トラヒック変動に対して各制御手法を適応し、時刻 1000 までに最大リンク利用率が 0.5 以下に下がったときに制御が成功したものとし、500 分以内に最大リンク利用率を 0.5 以下に下げることが出来なかったときは制御に失敗しトラヒック変動に適応出来なかったとした時の、各分散値に対しての制御成功率を示したものである。横軸が σ^2 、縦軸が成功率としている。この図から、アダプティブ制御は $\sigma^2 = 0.6$ までは 100 % 制御に成功して

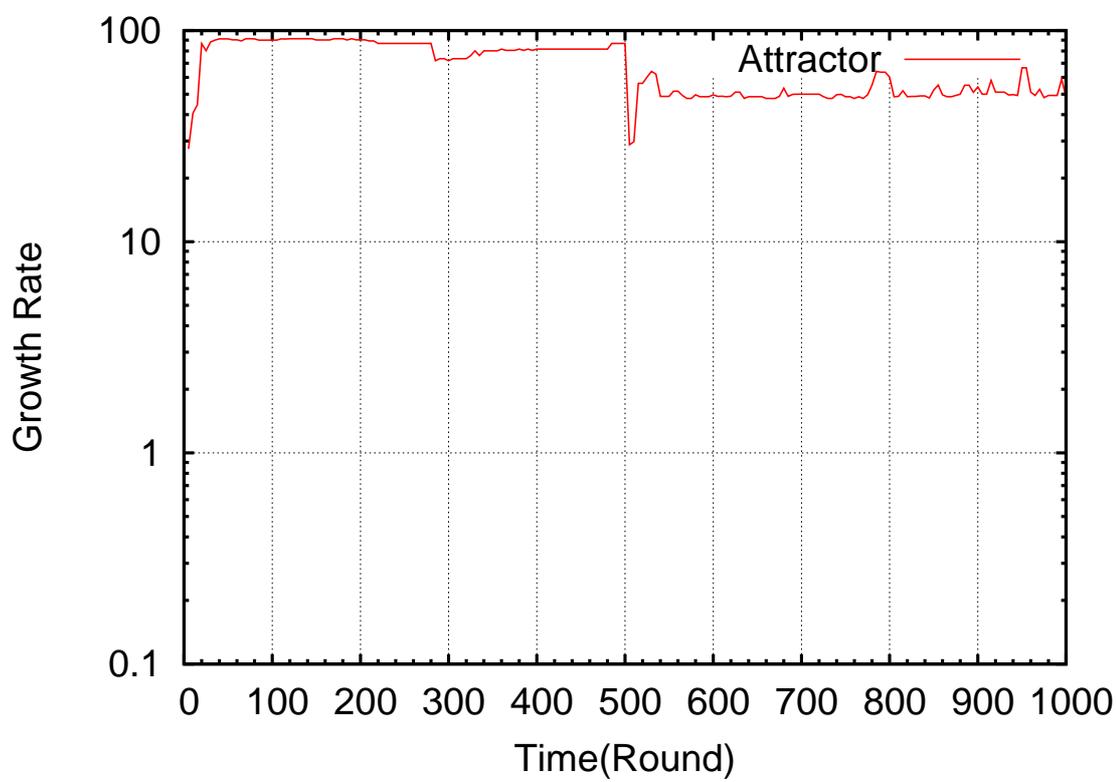


図 15: アトラクタ制御の成長レートの変化

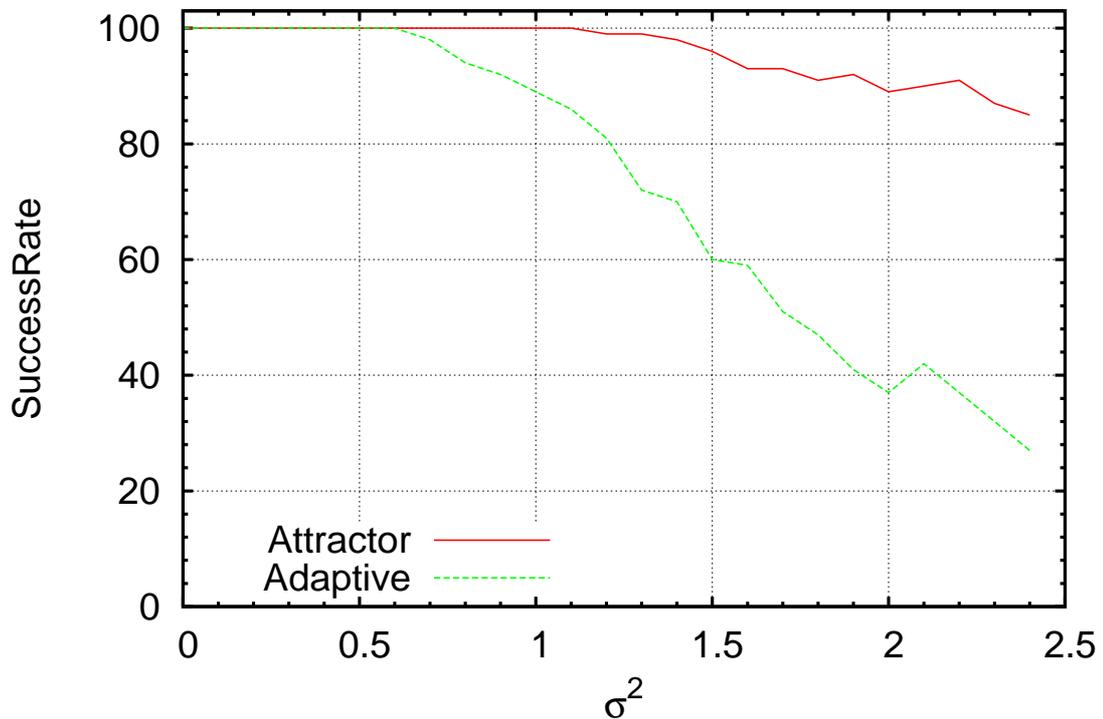


図 16: EON トポロジにおける制御の成功率

いるが、 σ^2 が 0.7 以上になると制御の失敗が起こり始め、 σ^2 が大きくなるにつれて制御の成功率は大きく下がり、 σ^2 が 2.4 の場合には成功率は 30 % 以下となっていることがわかる。それに対しアトラクタ制御ではアダプティブ制御が 100 % 制御可能であった $\sigma^2 = 0.6$ の倍近い $\sigma^2 = 1.1$ までは 100 % 制御に成功しており、 σ^2 が 2.4 の場合でも 80 % 以上の制御成功率を維持していることがわかる。

また図 17 はアトラクタ制御において、制御成功時を “success”、制御失敗時を “failure” として最大リンク利用率変化の例を示したものである。制御成功時は数回の制御により最大リンク利用率が 0.5 以下に下がっているが、制御失敗時にはトラヒック変動が大きすぎるために適応出来ず、最大リンク利用率が高いままとなっている。

次に、図 18、図 19 を示す。図 18 は制御に失敗した場合のデータを除き、トラヒック変動が起こってから制御に成功しネットワークの状態が回復するまでにかかった時間の平均値と 90 % 信頼区間を示したものであり、図 19 は同様に制御に失敗した場合のデータを除き、トラヒック変動が起こってから制御に成功しネットワークの状態が回復するまでにかかった時間の最大値を示したものである。それぞれ横軸が σ^2 、縦軸が回復までの時間となっている。

図 18 において、最大リンク利用率が 0.5 以下になるまでの平均時間に着目すると、 σ^2 が

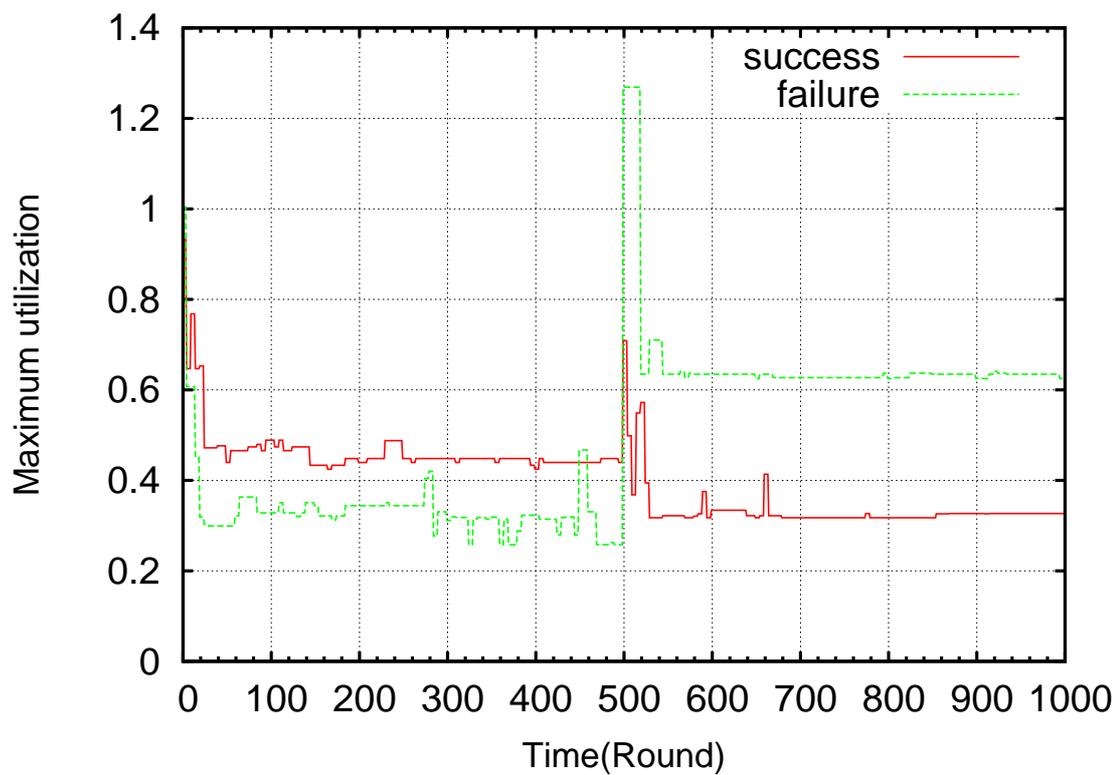


図 17: アトラクタ制御によるリンク利用率の変化：リンク利用率が改善される場合と改善されない場合

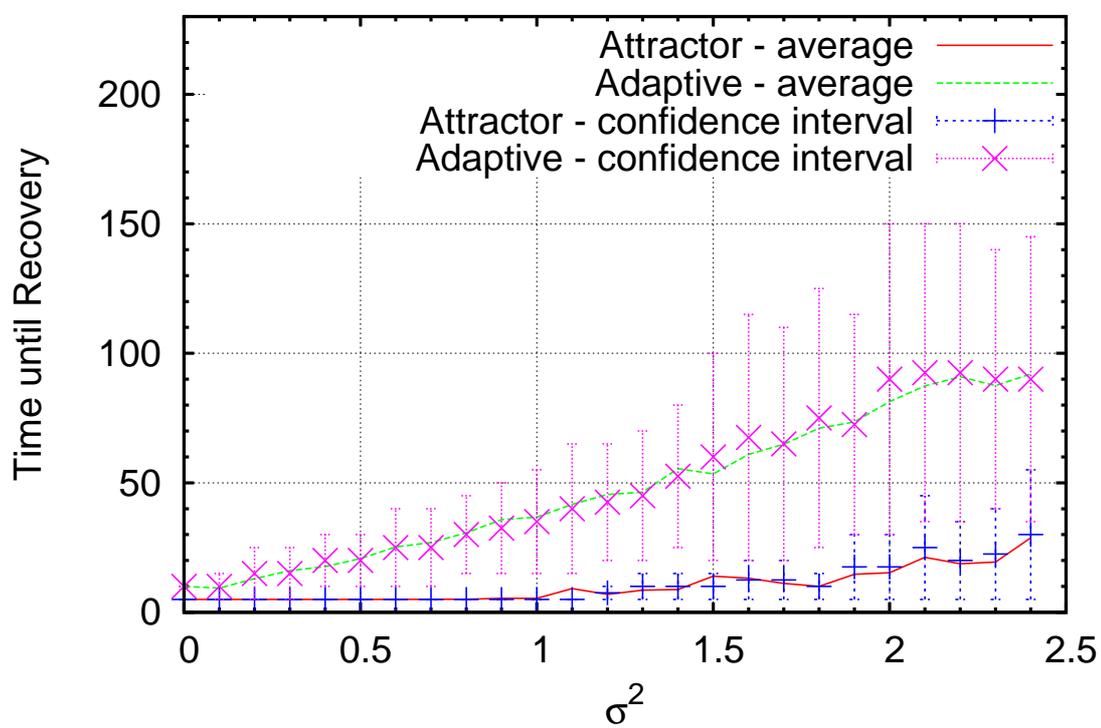


図 18: EON トポロジにおける回復時間の平均値と 90 %信頼区間

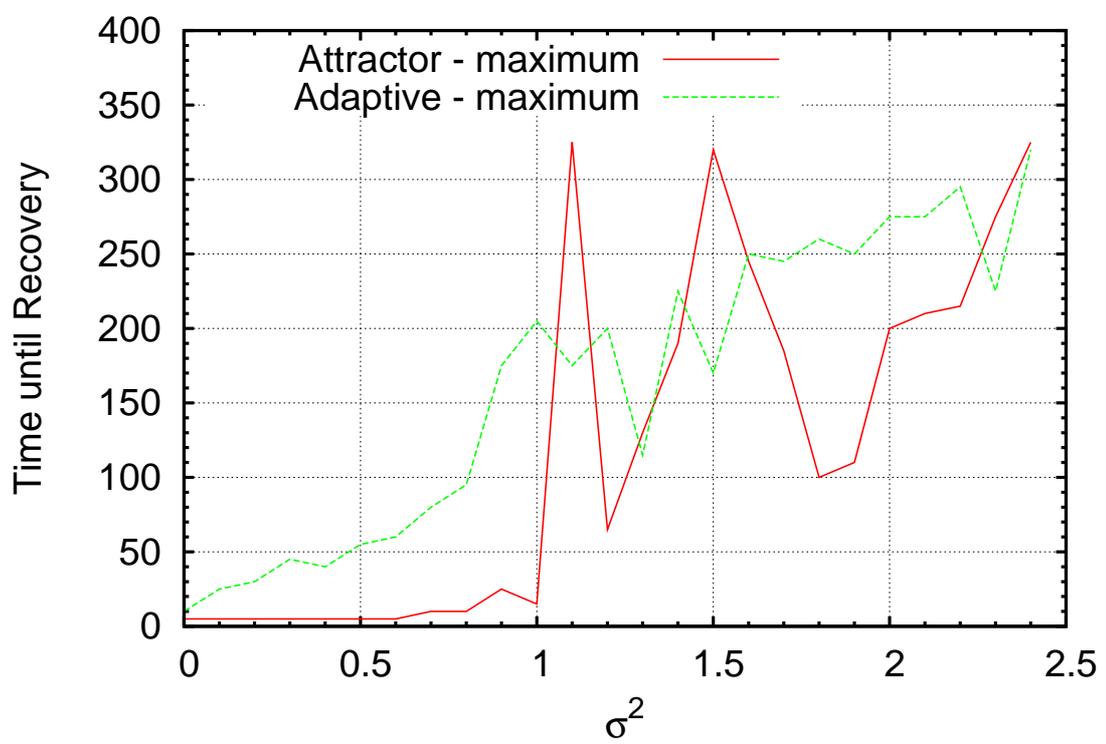


図 19: EON トポロジにおける回復時間の最大値

0 付近の場合はアトラクタ制御、アダプティブ制御ともに差がなく、数回の制御で変化に適応し回復している。しかし σ^2 が大きくなるとアトラクタ制御、アダプティブ制御に差が生まれ、アトラクタ制御の方がより早くトラヒック変動に適応し回復していることがわかる。 σ^2 が大きくなるほどその差は大きくなり、 σ^2 が 2.4 の場合アトラクタ制御では 30 分程度で回復しているがアダプティブ制御では 90 分程度かかっている。次に 90 %信頼区間に着目する。まずアダプティブ制御を見ると、アトラクタ制御と比較して信頼区間がかなり大きく、 σ^2 が 2.4 のときは 30 分から 150 分程度まで回復時間が大きくばらついていることがわかる。それに対してアトラクタ制御は比較的信頼区間の幅が狭く、 σ^2 が 2.4 の場合でも 5 分から 60 分程度で回復している。

図 19 において、最大リンク利用率が 0.5 以下になるまでの時間の最大値に着目する。これはこうこうこういう理由です。最大値では多くの σ^2 に対して、アトラクタ制御が下回っているが、 σ^2 が 1.1、1.5 の時のようにアトラクタ制御が大きく上回っているところがある。これは最大リンク利用率が大きくなった場合に、アトラクタ制御はゆらぎによって仮想網を制御するが、稀にゆらぎが上手く作用しなかった場合、回復までに非常に長い時間がかかるためである。これに関してはアトラクタ制御のパラメータを変更するなど改善される可能性がある。なお図 16 からわかるようにアダプティブ制御よりもアトラクタ制御の方が制御の成功率は高く、ゆらぎによって様々なトラヒック変動に適応出来ることがわかる。

この結果から回復までの最大値を見たときアダプティブ制御に比べてアトラクタ制御が大きく上回っている部分があったが、ほとんどの場合ではアトラクタ制御の方が上手く作用して早く回復しており、制御時間が長くなる場合はごくわずかであることがわかる。

図 20、図 21、図 22 は物理トポロジを EON トポロジから abilene トポロジに変更し、同様のシミュレーションを行った結果である。これらの結果からネットワークトポロジの規模が変化しても、EON トポロジの場合と同様に、アダプティブ制御では σ^2 が大きくなると大幅に成功率が下がるが、アトラクタ制御は高い成功率を維持し、より早くトラヒック変動に適応していることがわかる。

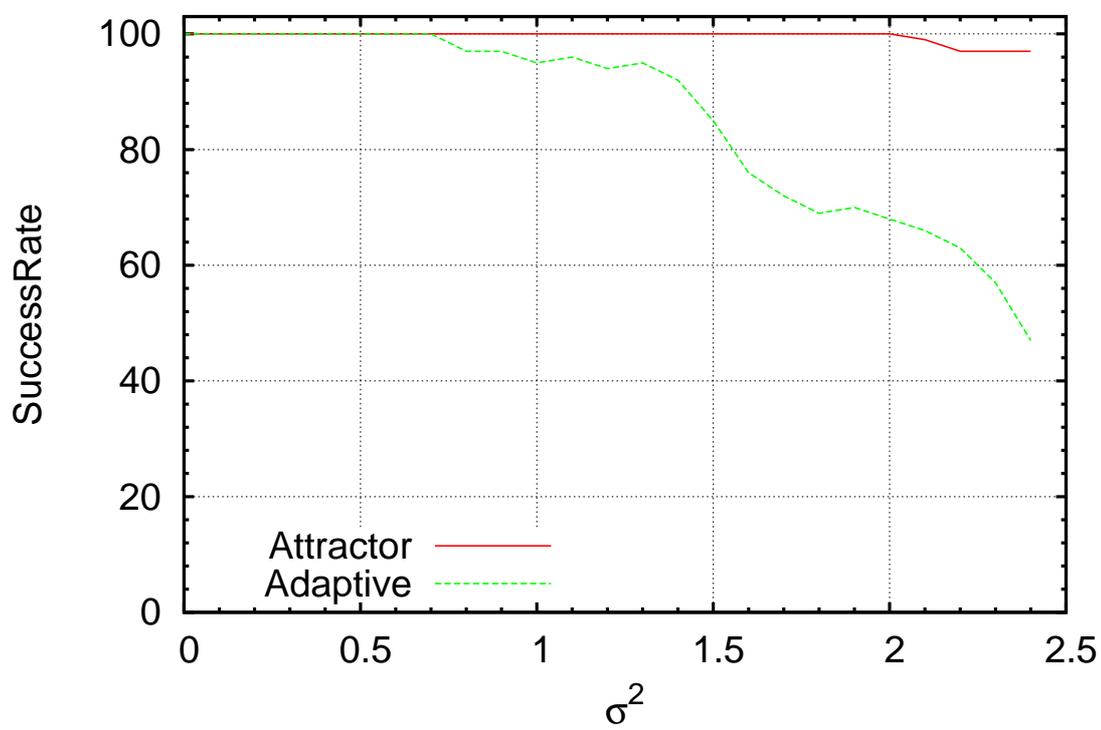


図 20: Abilene トポロジにおける制御の成功率

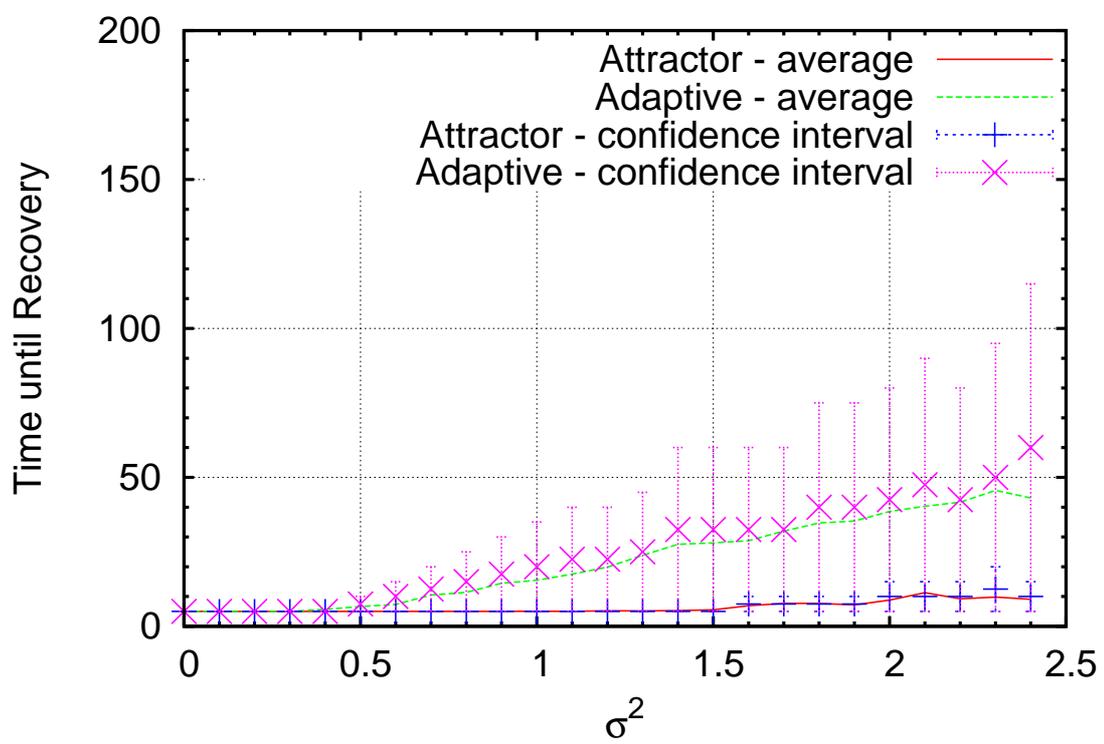


図 21: Abilene トポロジにおける回復時間の平均値と 90 %信頼区間

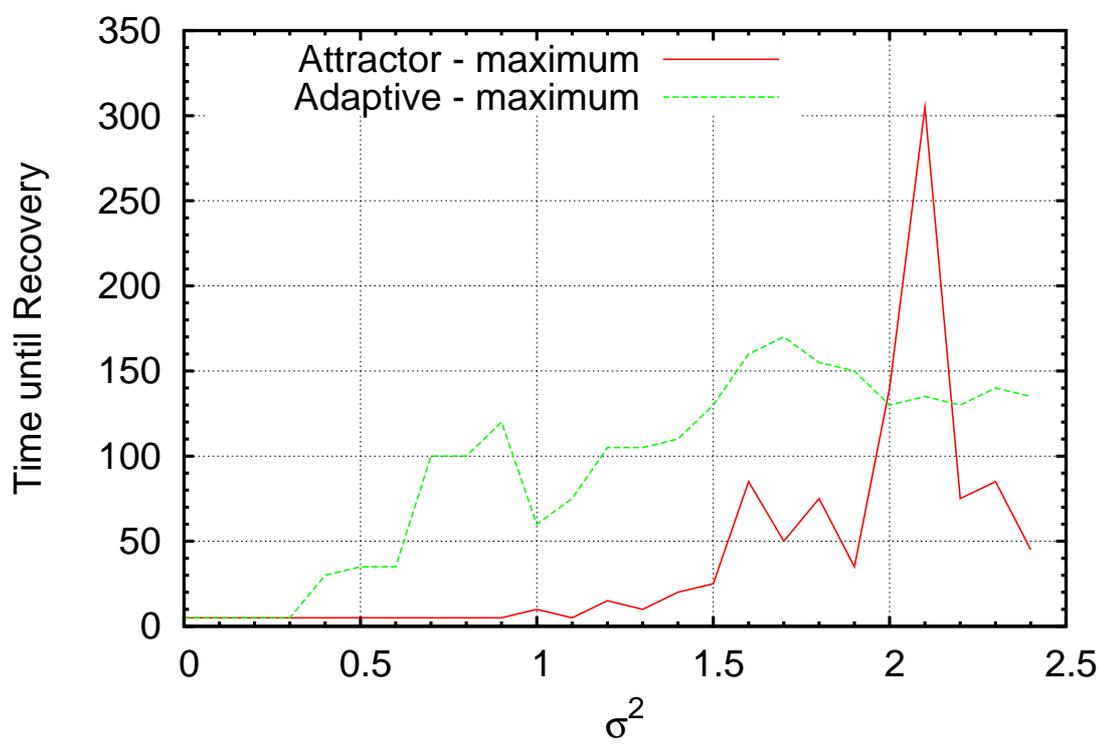


図 22: Abilene トポロジにおける回復時間の最大値

6 まとめと今後の課題

本報告では、トラヒック変動に対する適応性を備えた仮想網制御手法として、アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法に着目し、その適応性を計算機シミュレーションにより評価した。アトラクタ選択を用いた仮想網制御手法は、既存の仮想網制御手法と比較して、確実に制御可能なトラヒック変動の大きさが2倍程度であり、より大きなトラヒック変動に適応しリンク利用률을改善することが可能であることがわかった。また、リンク利用率改善に必要な制御回数は、既存の仮想網制御手法の十分の一程度となることを示した。また、物理トポロジが異なる場合においても同様の結果が得られており、アトラクタ選択を用いた仮想網制御は適応性が高いことが明らかとなった。

ただし、アトラクタ選択を用いた仮想網制御では、ゆらぎによる制御に起因して制御回数が増える事象が生じることも明らかとなった。本報告で用いたアトラクタ制御では、ゆらぎの大きさはネットワーク環境や制御回数に依存せず一定であるとしているが、例えば計測された最大リンク利用率に応じて、ゆらぎの大きさを変化させることで早くアトラクタ収束点を探索し、より早く環境の変化に適応させることも可能であると考えられる。ネットワーク環境の変化の程度に応じたアトラクタ制御のパラメータ設定方法は今後の課題である。

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、ならびに大阪大学大学院経済学研究科の天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、様々な助言を下さった小泉佑揮氏、筒井宣充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 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001)*, 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] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, "On the integration of IP routing and wavelength routing in IP over WDM networks," *Technical Report of IEICE*, pp. 25–30, Aug. 2005.
- [8] 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.
- [9] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proceedings of IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, vol. 4, pp. 2543–2553, Mar. 2005.

- [10] 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.
- [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 IEEE 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, pp. 57–65, June 2002.
- [12] 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.
- [13] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [14] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Application of attractor selection to adaptive virtual network topology control," in *Proceedings of ACM 3rd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2008)*, Nov. 2008.
- [15] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 31, pp. 206–217, June 2003.