

# ゆらぎを用いる光パストポロジー制御

荒川 伸一・小泉 佑揮・村田 正幸

## Noise-Induced Virtual Network Topology Control

Shin'ichi ARAKAWA, Yuki KOIZUMI and Masayuki MURATA

We have proposed a self-organized virtual topology control method that is adaptive to environmental changes in a network, such as link and node failures or traffic changes. Our control method is based on attractor selection, which models the biological systems that behave adaptively against changes in their surrounding environments. In this paper, we present an overview of our control method and explain the role of “noise” which is an essential factor to provide adaptability.

**Key words:** wavelength division multiplexing, wavelength routing, virtual network topology, attractor selection

近年、通信のブロードバンド化やサービスの多様化は急速に進展し、通信ネットワークは国民生活における社会インフラとして幅広い分野において活用されるようになってきている。その結果、例えば、国内のブロードバンド加入者の総通信量は年率 1.5 倍で増加しているとされ、2012 年時点で 1.7 Tb/s、2020 年にはペタビット級になる可能性もある。このような通信量増大はわが国にとどまらず、世界的な傾向であることは多くの調査で明らかにされているところである。その結果、基盤ネットワークを現状のルーター技術で構成すると、コスト、設置スペース、電力など多くの面から破綻をきたすことが懸念されている。また、YouTube などに代表される CGM (consumer generated media) の隆盛に伴い、特定人気サイトへの通信集中など、通信量の急激な変化が最近頻繁に発生するようになってきている。今後もこのようなキラーアプリケーション、キラーサービスが登場するたびに通信量に大きな変化が現れれば、計画的なネットワーク設備投資は一層困難になると予想される。これらの諸問題を解決するためには、光通信技術を積極的に取り入れ、光ノードとルーターからなる物理基盤を構築し、通信量変動による負荷増大や故障等による障害に対して復旧を速やかに行うことが求められる。

そのための解決策として、物理基盤に波長多重技術

(WDM: wavelength division multiplexing) に基づく光通信ネットワークを用いて波長を単位としたパスを設定し、上位層プロトコルのデータを転送するような階層化ネットワーク構成制御が考えられる。波長ルーティング (wavelength routing) は、光通信ネットワークにおける各ノードにおいて光信号の交換を行い、波長チャンネルによって構成される光パスを IP ルーター間に設定するものであり、その結果、光通信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。すなわち、複数の光パスを用いて光パストポロジー (VNT: virtual network topology) を構築することによって、仮想化された IP ネットワークを構築することが可能になる (図 1)。

光パストポロジーの設計および制御に関する研究では、従来、混合整数線形計画法 (MILP: mixed integer linear programming) によって最適解を導出する手法が検討されてきた。そこでは、すべてのルーター間の通信量を長期にわたって計測することでルーター間の通信需要を算出し、その通信需要に対して性能が最適化される光パストポロジーを求める手法が検討されている。しかし、MILP ではノード数の増大に対して計算量が爆発的に増大するため、実用的な時間で解を計算することはできない。また、計算

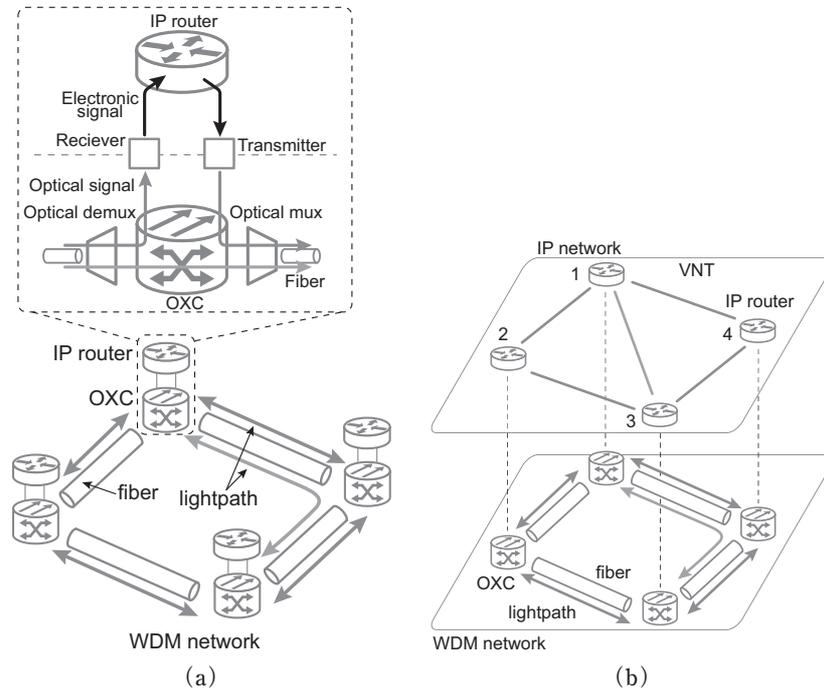


図1 光パストポロジーの構築. (a) 光通信ネットワーク, (b) 光信号交換による光パストポロジーの構築.

時間の短縮を狙った発見的手法により解を求める手法も数多く検討されてきたが、それらの手法は基本的に MILP と同様に、ネットワークの構成情報や通信量の情報を収集し、現在の通信需要に対する最適解もしくは準最適解を導出することによって光パストポロジーを決定するものであり、通信量の変動に対する適応性を考慮したものではない。

以上のことから、ルーター数の増大に対する計算量および収集情報量の爆発的な増大を回避しつつ、通信量の変動に対する適応性を高め、さらに、機器故障やリンク故障に対応するためには、新しい概念に基づく制御手法を考案する必要がある。

筆者らは、このような考えのもと、従来の光パストポロジー制御で必要とされるルーター間の通信需要の計測・情報収集を不要とし、より簡便な手段で取得可能な情報を用いた光パストポロジー制御手法を検討してきた<sup>1)</sup>。具体的には、現在の通信環境を把握し最適な光パストポロジーを求めるのではなく、現在の通信品質が良いか否かのみをフィードバック情報として利用し、かつ、「ゆらぎ」を積極的に用いて現在の通信環境に適した新たな光パストポロジーを探索し制御する手法を検討している。本解説論文では「ゆらぎ」を用いる光パストポロジー制御手法の動作原理と利点を述べる。まず「ゆらぎ」を用いるシステム制御の概念と利点を1章で説明し、次に2章において「ゆらぎ」を用いる光パストポロジー制御の詳細を説明する。

## 1. ゆらぎ制御

ゆらぎを用いるシステム制御は脳や生体に共通してみられる制御原理であり、全体システム制御がプリプログラムされていないとしても、ノイズを生かして環境変動に対して適応的に動作する自己組織型制御の一種である。全体像を把握したシステム制御を不要とする結果、エネルギー消費の著しい低減が実現されるものである。生物システムは、分子から細胞、脳、個体、さらには社会レベルに至る階層をもつ、複雑かつ高次元でダイナミックなシステムである。このようなシステムが決定論的手法で制御されていると考えるのは、制御すべきパラメーターがあまりにも多く、現実的でない。実際、これまでの研究によって、生物は、大きなエネルギーを用いて厳密さを追求する方法ではなく、むしろノイズを遮断せずに利用することによって、高次元なシステムを制御していることがわかってきている。脳や生体、細胞レベルで、その制御機構を説明するのがゆらぎ制御であり、制御状態  $x$  を決定する数理モデルも、以下のランジュバン型の式で表されるものとしてすでに確立されている<sup>2,3)</sup>。

$$\frac{dx}{dt} = \text{activity} \cdot f(x) + \eta \quad (1)$$

この制御式の構成要素の1つめは、 $f(x) = -dU(x)/dt$  (ただし、 $U$  はポテンシャル関数) である。ポテンシャル関数  $U(x)$  は、状態  $x$  に対して、ノイズ項  $\eta$  に基づいてア

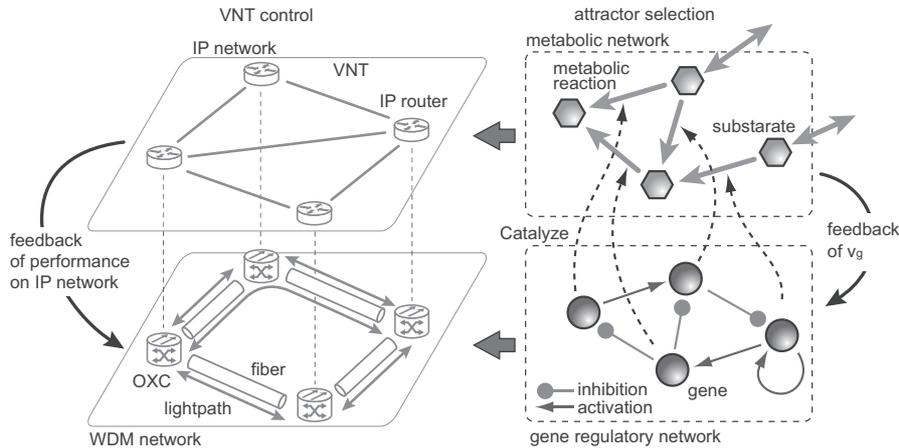


図2 遺伝子・代謝ネットワークと仮想網制御の対応.

トラクターを探索することを可能とする構造をもつエネルギー関数である。2つめはアクティビティである。アクティビティは、環境変動に応じてポテンシャル関数を変調させることによってノイズによるアトラクター探索を実現するものであり、システムにとっての「心地のよさ」を表す。もっとも重要なものはノイズ項  $\eta$  であり、システムの詳細な構造を記述することなく、アトラクターを探索することを可能にする。

情報ネットワークにおいては、以下のように言い換えることができる。すなわち、対象とする情報ネットワークの制御構造を  $f(\mathbf{x})$  で記述し、望ましい安定状態をアトラクターとして表現する。その結果、アクティビティによって変調された  $f(\mathbf{x})$  に基づいて、解探索がノイズによって駆動される。アクティビティは、情報ネットワークにおいては対象となるシステムの性能指標に相当する。ここで特に重要な点は、環境特性も制御構造のパラメーターに埋め込むことによって、通信量の変動や故障などによる環境変動をあらかじめ想定した制御を定義する必要がない点である。すなわち、情報ネットワークにおいては、システム状態を把握するための膨大なノード間の情報交換を必要とせず、また、システムの全状態を考慮した全体最適化問題を解く必要がないことを意味する。その結果、制御に必要な計算時間を飛躍的に短縮することが期待できる。

## 2. ゆらぎ制御にもとづく光パストポロジー制御

### 2.1 概要

われわれの光パストポロジー制御では、1章で述べたゆらぎ制御を実現するモデルのひとつであり、細胞の活性度に応じて遺伝子ネットワークが代謝ネットワークを制御する数理モデルであるアトラクター選択<sup>4)</sup> (attractor selection) を用いる。アトラクター選択は、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 (アクティビティ) によって制御されるモデルであり、生物システムが未知の環境変化に適応し生物システムの状態を安定点 (アトラクター) へと制御する選択による状態制御がなされる。

図2は、遺伝子ネットワークによる代謝ネットワーク制御が、光パストポロジー制御にどのように対応づけられるかを示した図である。遺伝子ネットワークには複数種の遺伝子があり、遺伝子が発現すると代謝反応に対して触媒作用を及ぼす。代謝ネットワークの代謝反応量を活性度とし、遺伝子は互いに活性および抑制の相互作用によって、それぞれの遺伝子  $i$  の発現量  $x_i$  を変化させる。光パストポロジー制御においては、光パスを設定可能なすべてのルーター間に対して生物モデルの遺伝子があるものとし、遺伝子の発現量が多い場合に光パスを設定し、また、発現量が少ない場合は光パスを除去する。活性度は、IPネットワークの品質指標に対応付ける。これによりIPネットワークの品質に応じてポテンシャル関数を変調し、「心地のよい」光パストポロジーの探索が行われる。

ゆらぎ制御の観点から述べると、ある光パストポロジーが環境に対して十分な性能が確保できない場合は、アクティビティが小さくなり、システムはポテンシャル関数の安定点 (光パストポロジー (仮想ネットワーク A)) から容易に推移可能となる。この様子を図3に示す。図中の曲線は関係式  $f(\mathbf{x}) = -dU(\mathbf{x})/dt$  により変換されるポテンシャル関数を表現したものである。また、光パストポロジーの状態空間は、その状態変数の数が  $n$  であるとき、本来は  $n$  次元空間上の曲線となるが、形式的に一次元で表現している。図中の球体の位置は、システムの状態である  $n$

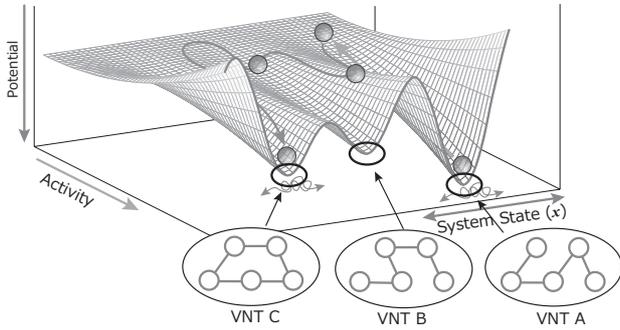


図3 ゆらぎ制御にもとづく光パストポロジー制御の動作概要.

次元ベクトル  $(x_1, \dots, x_n)$  を表している. アクティビティーが小さい場合には, システムはノイズ項  $\eta$  により駆動され, いずれ現在のネットワーク環境に適した安定点である光パストポロジー (仮想ネットワーク C) へと引き込まれ, 新しい光パストポロジーが構築される. なお, 大局的な制御を行う従来の手法では, 大局的情報としてすべてのルーター間の通信量の情報を収集するが, 以降に述べる光パストポロジー制御手法では局所情報であるアクティビティーを求めるために, 光パストポロジーの各光パスを経由する通信量 (リンク通信量) の情報を収集しており, 収集情報量の飛躍的な削減を実現している.

## 2.2 アトラクター選択を用いた光パストポロジー制御

$N$  台のルーターから構成される光通信ネットワークを考える. あるルーター間  $i$  に対して光パスを設定する / しないを決定する二値の制御変数を  $l_i$  とおくと, 光パストポロジーの状態は,  $\mathbf{L} = (l_1, \dots, l_i, \dots)$  と表記される. なお, 以降ではすべてのルーター間に光パスを設定可能であると仮定し,  $\mathbf{L}$  の要素数は  $N(N-1)$  であるものとする. アトラクター選択を用いた光パストポロジー制御では,  $l_i$  の状態を決定するための遺伝子  $i$  があるものとし, 遺伝子  $i$  の発現量  $x_i$  によって光パスの設定 / 除去を制御する. 発現量  $x_i$  は, 以下の時間発展方程式で決定される.

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

$$\zeta(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\mu z)} \quad (3)$$

ここで, 式 (2) の右辺第一項の  $\zeta \left( \sum_j W_{ij} \cdot x_j \right) - x_i$  は, アトラクターをもつ制御構造であり, 式 (1) の  $f(\mathbf{x})$  に相当する. アトラクターをもつ制御構造は, 遺伝子間の相互作用を表す制御行列  $W_{ij}$  によって定まる. なお,  $W_{ij}$  をどのように定めるかは次節で詳しく述べる.  $\eta$  はノイズ項であり, 本稿では平均 0 のガウシアンノイズを用いる.

$\alpha$  は, システム状態である光パストポロジーの「心地よ

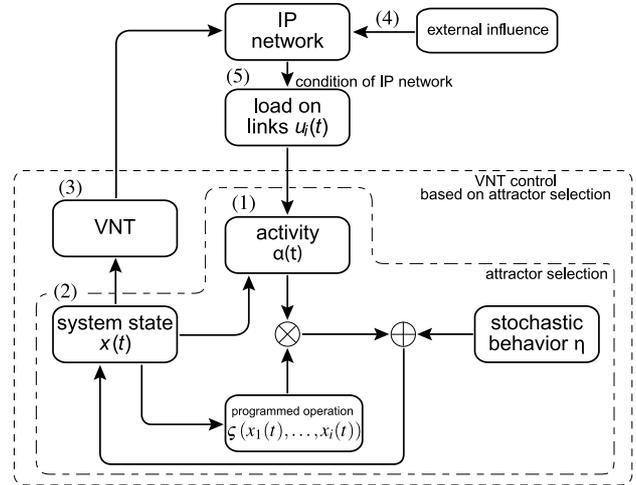


図4 アトラクター選択にもとづく光パストポロジー制御の制御フロー.

さ」を表す活性度であり, IPネットワークの品質指標を用いて定義される. 品質指標としては, 例えばルーターの packets 処理量や消費電力量, もしくは平均リンク利用率なども考えられるが, ここでは最大リンク利用率を用いる. 具体的には,  $l_i$  の利用率  $u_i$  を,  $l_i$  を流れるトラフィック量を  $l_i$  の容量で正規化した値とし, IPネットワークの最大リンク利用率を  $u_{\max} = \max_i u_i$  とする.  $\alpha$  は,  $u_{\max}$  を用いて,

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

と定義する. ただし,  $\zeta, \delta$  は定数である. 活性度  $\alpha$  の値域は  $[0, 1]$  となる.  $\alpha$  は  $u_{\max}$  が  $\zeta$  を超えると 0 に近づき,  $u_{\max}$  が  $\zeta$  未満では 1 に近づく.  $\delta$  は  $u_{\max}$  が  $\zeta$  近傍での  $\alpha$  の変化量を調整するパラメーターであり,  $\delta$  が大きいほど傾きが急になる.  $\alpha$  を上述のように定義することによって, 最大リンク利用率  $u_{\max}$  が  $\zeta$  より大きい場合は, IPネットワークの品質が悪いとみなして  $\alpha$  を 0 に近づけ, ノイズ項  $\eta$  によって新たなアトラクターが探索されることとなる. 一方,  $u_{\max}$  が  $\zeta$  よりも大きい場合は, IPネットワークの品質が良いとみなし, アトラクターに収束するように光パストポロジーを制御する.

光パストポロジーの状態  $\mathbf{L}$  は, 遺伝子  $i$  の発現量  $x_i$  によって決定する. 具体的には, 閾値を 0.5 とし,  $x_i > 0.5$  のときに光パス  $l_i$  を設定し,  $x_i \leq 0.5$  のときは光パス  $l_i$  を設定しないものとする.

IPネットワークの品質指標である  $\alpha$  は, 光パストポロジーの状態  $\mathbf{L}$  が実ネットワークに反映されたのち更新される. したがって, アトラクター選択にもとづく光パストポロジー制御の制御フローは図4のようになる. なお, ここでは光パストポロジーを再構成するステップを制御ステッ

プとよび、各種変数に  $t$  を付与している。

- (1) 制御ステップ  $t$  における光パストポロジ  $L_t$  を構成する光パスのリンク利用率  $u_i(t)$  の情報を収集し、IP ネットワークの最大リンク利用率にもとづいて  $\alpha(t)$  を計算する。
- (2) 式 (2) にしたがって、 $x_i(t)$  を計算する。
- (3)  $x_i(t)$  の発現量にもとづいて制御ステップ  $t+1$  の光パストポロジ  $L_{t+1}$  を計算する。
- (4) 計算した光パストポロジ  $L_{t+1}$  を実ネットワークに投入する。機器故障等により光パスを設定できない場合は、それを  $L_{t+1}$  に反映する。この時点で新たな光パストポロジ  $L_{t+1}$  にパケットが流れる。制御ステップ  $t \leftarrow t+1$  とし、再び (1) に戻る。

### 2.3 制御行列

アトラクター選択は、活性度をフィードバックさせつつ、ゆらぎとポテンシャル関数がシステムの振る舞いに与える影響をコントロールしながら、現在の環境に適したアトラクターを探索する機構である。アトラクター選択にもとづく光パストポロジ制御では、収束したアトラクターにおける  $(x_1, \dots, x_n)$  をもとに光パストポロジ  $L$  を計算し、光パストポロジを構築する。したがって、アトラクターは構築される光パストポロジの候補とみなすことができる。そのため、 $\zeta \left( \sum_j W_{ij} x_j - \theta \right) - x_i$  によるポテンシャル曲線をどのように決めるか、すなわち、制御行列  $W_{ij}$  をどのように定めるかという課題が残される。

筆者らは、まず光パス  $l_i$  と  $l_j$  に対応する遺伝子  $x_i$  および  $x_j$  間に活性・抑制の関係を規定することによって、制御行列  $W_{ij}$  を定める方法を検討した<sup>1)</sup>。ここではゆらぎ制御を用いることによって通信量の変動への適応性が高まることを確認したが、制御行列  $W_{ij}$  の入念な設計が必要であることがわかった。そこで、現在は光パストポロジ候補をいくつか用意し、それらの候補がアトラクターとなるよう制御行列  $W_{ij}$  を決定する方式を用いている。具体的には、ホップフィールドネットワーク<sup>5,6)</sup>の知見を利用し、パターン直交化手法<sup>7)</sup>を用いて以下の手順で  $W_{ij}$  を決定する<sup>8)</sup>。

アトラクターとして保持する光パストポロジ候補の集合を  $(g^{(1)}, \dots, g^{(k)}, \dots, g^{(m)})$  とし、光パストポロジ候補  $g^{(k)}$  に対応する遺伝子発現量を  $\mathbf{x}^{(k)} (= (x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}))$  とする。ベクトル  $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$  を行とする行列  $\mathbf{X}$  を定義すると、制御行列  $W_{ij}$  は以下の通りに定義できる。

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

ここで、 $\mathbf{X}^+$  は  $\mathbf{X}$  の疑似逆行列である。パターン直交化を

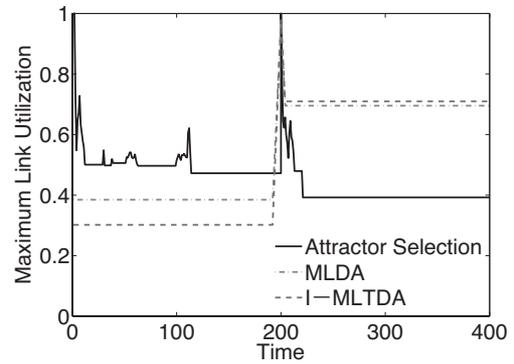


図5 環境変動に伴う最大リンク利用率の時間変化。

用いてアトラクターを定義した場合は、そのアトラクターの安定性が高いことが知られている。なお、パターン直交化以外にも、ヘブ則<sup>6)</sup>などにより簡便な方法を用いることも可能である。

### 2.4 環境変動への適応性

アトラクター選択を用いた光パストポロジ制御手法について、計算機シミュレーションによる評価と、実機実験による動作検証を進めている。ここでは、計算機シミュレーションを用いて機器故障に対する適応性を評価した結果の一部を示す。なお、制御手法において、ノイズ項  $\eta$  の分散は 0.15、制御行列  $W_{ij}$  で保持するアトラクター数  $m$  は常に 20 としている。その他のパラメータ値については文献 8) と同じとしている。制御行列  $W_{ij}$  の初期値はランダムに生成した光トポロジを用いるが、制御の過程で現在の環境に適した光パストポロジが発見されれば、その光パストポロジをアトラクターとして  $W_{ij}$  を再計算している。

100 ノード 496 光ファイバーからなる光通信ネットワークを対象とし、ノード障害 (ルーターおよび光ノードの障害) が発生したときの最大リンク利用率の時間変化の一例を図 5 に示す。横軸は制御ステップ数であり、制御ステップ 200 においてランダムに選んだ 20 ノードに障害を発生させている。初期光パストポロジはランダムに生成している。計算機シミュレーション開始直後 (ステップ 0) は、ランダムに設定した通信需要によって最大リンク利用率が高い。そのため、アクティビティーは低下し、ノイズ項によるアトラクターの探索が行われ、時間経過とともに最大リンク利用率が  $\zeta (= 0.5)$  付近となる光パストポロジへと収束していることがわかる。制御ステップ 200 においてノード障害が生じると、障害が発生したノードと、そのノードに接続している光ファイバー、ならびに、その光ファイバーを利用していた光パスが利用できなくなる。IP ネットワークでは一部の光パスが利用できなくなるため、

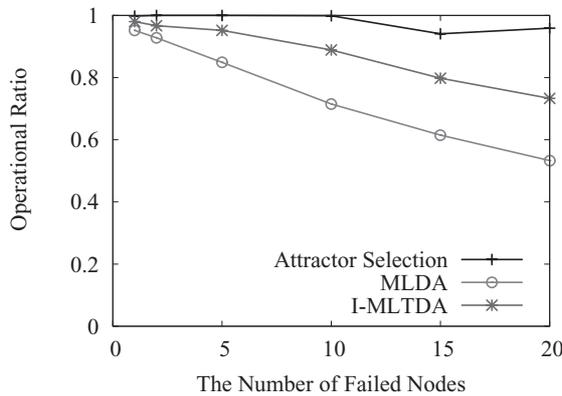


図6 ノード障害規模に対する制御成功率.

障害後に利用可能な光パスを用いてパケットを迂回させることになり、最大リンク利用率が高くなっている。なお、ここでは、光通信ネットワークでは障害検出や障害機器迂回のメカニズムなどはもたないものとしている。すなわち、光信号レベルでの迂回を行わないものとし、光パスは、ノード障害発生中は常に利用不可能であるものとする。したがって、MLDAやI-MLTDAなどの発見的手法を用いるにあたって適切なネットワーク構成情報を利用できないため、最大リンク利用率が高くなっている。一方、アトラクター選択を用いた光パストポロジー制御では、制御ステップ200で生じたノード障害によりアクティビティーが低下した場合においても、時間経過とともに最大リンク利用率が $\zeta(=0.5)$ 付近となる光パストポロジーへと収束している。

図6は、ノード障害の規模の違いに対する各光トポロジー制御手法の適応性を評価した結果である。横軸はノード障害の規模であり、縦軸は制御手法の成功率を示している。成功率は、障害発生後に最大リンク利用率が $\zeta$ 以下になる光パストポロジーに収束した割合である。ここではそれぞれのノード障害規模に対して1000パターンの試行を行い、成功率を求めている。図をみると、大局的情報を用いることを前提とする発見的手法では、障害規模が大きくなるとともに成功率が低下していることがわかる。一方、アトラクター選択にもとづく光パストポロジー制御を用いた場合、障害規模が大きくなっても成功率が低下しないことがわかる。

本解説論文では、ゆらぎを用いる光パストポロジー制御手法とその利点を説明した。制御手法では、光パストポロ

ジーをゆらぎと確定的な振る舞いによって決定し、それらの2つの振る舞いの変調が光パストポロジーの品質を示すフィードバック値(アクティビティー)によってなされる。これにより、従来の発見的手法で必要であった、システム状態を把握するためのネットワーク構成は、通信需要の情報などの大局的な情報が不要となり、また、大局的な情報にもとづくMILP等を用いた光パストポロジー計算が不要となる。

ゆらぎを用いる光パストポロジー制御手法にとって重要となるのは、制御ステップの間隔の最小化である。すなわち、アクティビティーを取得し光パストポロジーを再構成するまでの間隔を極力短くすることが重要である。5ノード規模での実機検証<sup>9)</sup>では制御間隔を1分とし、制御ステップ数10程度で環境変動に適應することを確認しているが、ノード規模が大きくなるとともに制御間隔は増大するものと予想される。ゆらぎを用いる光パストポロジー制御がより有用となるためには、光パストポロジーの再構成の高速化、すなわち、光信号レベルでの切り替え処理の高速化が重要であると考えられる。

## 文 献

- 1) Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto and M. Murata: "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *J. Lightwave Technol.*, **28** (2010) 1720-1731.
- 2) 柳田敏雄, 四方哲也, 石黒 浩, 村田正幸: "生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム", *応用物理*, **78** (2009) 788-794.
- 3) 若宮直紀, ライブニッツ賢治, 村田正幸: "生物の適応性・頑健性に学ぶ自己組織型ネットワーク設計手法・制御技術", *電子情報通信学会誌*, **91** (2008) 870-874.
- 4) C. Furusawa and K. Kaneko: "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Comput. Biol.*, **4** (2008) e3.
- 5) R. Rojas: *Neural Networks: A Systematic Introduction* (Springer, Berlin, 1996).
- 6) J. J. Hopfield: "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **79** (1982) 2554-2558.
- 7) Y. Baram: "Orthogonal patterns in binary neural networks," *Technical Memorandum*, 100060 (NASA, 1988).
- 8) 小泉佑揮, 荒川伸一, 鎌村星平, 島崎大作, 宮村 崇, 平松 淳, 村田正幸: "アトラクター選択にもとづく仮想網制御の複数ノード障害に対する適応性", *電子情報通信学会技術報告* (PN2012-78), **112** (2013) 1-6.
- 9) 小泉佑揮, 荒川伸一, 鎌村星平, 島崎大作, 笹山浩二, 村田正幸: "アトラクター選択にもとづく仮想網制御の実装と実証実験によるトラフィック変動に対する適応性の評価", *電子情報通信学会技術報告* (PN2013-30), **113** (2013) 33-38.

(2013年12月18日受理)