

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 トラヒック変動に対する適応性の評価

小泉 佑揮[†] 荒川 伸一[†] 鎌村 星平^{††} 島崎 大作^{††} 笹山 浩二^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

^{††} 日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所

E-mail: [†]{ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

^{††}{kamamura.shohei,shimazaki.daisaku,sasayama.koji}@lab.ntt.co.jp

あらまし これまでに、トラヒック変動などの環境変化に対して適応的に仮想網を再構築する自己組織化制御を提案した。提案手法は、生物が環境変化に対して適応的に振る舞う様子をモデル化したアトラクター選択を応用した制御方式である。これまでに、そのトラヒック変動に対する適応性の高さシミュレーションにより示してきた。本稿では、提案手法を実装し、構築した小規模な実験ネットワーク上で実証実験を実施した。実証実験により、提案手法が実ネットワークでもトラヒック変動に対して適応的に仮想網を制御することを示す。

キーワード 波長分割多重、波長ルーティングネットワーク、仮想網制御、アトラクター選択

Implementation and Evaluation of Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection

Yuki KOIZUMI[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Shohei KAMAMURA^{††}, Daisaku SHIMAZAKI^{††}, Koji SASAYAMA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} NTT Network Service Systems Laboratories

E-mail: [†]{ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

^{††}{kamamura.shohei,shimazaki.daisaku,sasayama.koji}@lab.ntt.co.jp

Abstract 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, in the previous work. It is based on *attractor selection*, which models the biological systems that behave adaptively against changes in their surrounding environments. We have shown that our method is adaptive to changes in network environments through simulation. In this paper, we implement our proposed method and evaluate it on a small testbed. Through experiments, we show that our proposed method adaptively responds to changes in traffic.

Key words Wavelength Division Multiplexing, Wavelength-routed Optical Network, Virtual Topology Control, Attractor Selection

1. はじめに

波長分割多重 (WDM) ネットワークでは、波長ルーティングを用いることで、光パスと OXC から構成される仮想的なトポロジ (仮想網) を構築し、柔軟なネットワークインフラストラクチャーを提供することができる。トラヒックを波長ルーティング WDM ネットワーク上に効率的に收容するために、トラヒックに応じて適切に仮想網を構築する仮想網制御に関する研究が数多くなされている [1,2]。文献 [3,4] では、与えられた単一のトラヒックデマンドマトリックスに対して、そのトラヒックを

收容するために最適な仮想網を設計するための、最適化にもとづく方法、およびヒューリスティックな方法が提案されている。

インターネット上では、VoIP、ビデオオンデマンドなどに代表される新たなサービスが出現しており、ネットワーク上で生じる環境の変化は大きくなっている。一つの例として、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の相互作用により、トラヒックなど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明らかにされている [5,6]。また、ネットワーク上ではトラヒックの変動に加え、リンク障害

やノード障害などのネットワーク機器の障害による変動も生じる。そのため、ネットワーク環境の変動に対して適応性を備えた仮想網制御を実現することが重要である。

我々のグループでは、ネットワーク上の環境変動に対する適応性を備えた仮想網制御手法を提案してきた [7]。これは、生物システムが未知の環境変化に対して適応的に振る舞う様子をモデル化したアトラクター選択を応用した自己組織型仮想網制御手法である。アトラクター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 [8,9]。既存のヒューリスティックや最適化によるアプローチでは、想定外の環境変化に適応できない。これに対して、アトラクター選択を応用した仮想網制御手法は、未知の環境変化や大きなトラヒック変動に対しては、ゆらぎを主体として仮想網を再構築するため、環境変化に対する高い適応性を備えている。さらに、生物システムにおけるアトラクター選択では、環境の変化に関する情報を制御システムに伝達するシステムが未熟であるにも関わらず、環境変化に対して適応する能力を有している。我々は、この特徴を利用することで、既存の仮想網制御方式で必要であった交流トラヒック行列の計測を不要とし、交流トラヒック行列よりも情報量が少ないものの SNMP などにより直接取得可能であるリンク利用率のみを用いることで、環境変化に対してより早く反応し適応することが可能な仮想網制御を実現した [7]。

これまでの研究では、シミュレーションによって、提案手法の環境変動に対する適応性を評価してきた。シミュレーション上では、トラヒック変動のみならず、リンクやノード障害に対しても高い適応性を示すことを明らかにしてきた。本稿では、提案手法を実装、さらに小規模なテストベッドを構築し、提案手法のトラヒック変動に対する適応性を実ネットワーク上で実証する。

本稿の構成は以下の通りである。2章では提案手法であるアトラクター選択を用いた仮想網制御を述べ、次に、3章で構築した小規模テストベッドの説明と、それを用いた実証実験の結果を示す。最後に4章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. アトラクター選択を用いた仮想網制御

本章では、提案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説明する。

2.1 概要

はじめに、アトラクター選択を用いた仮想網制御の概要を述べる。提案手法は文献 [9] に示されている、細胞内の遺伝子ネットワークと代謝反応ネットワークにおけるアトラクター選択を応用する。このモデルでは、遺伝子ネットワークがアトラクター選択により代謝ネットワークを制御することで環境変化に対して適応的に振る舞い、細胞の成長を維持する。図1に示すように、遺伝子ネットワークを仮想網制御に適用し、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、仮想網制御は 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

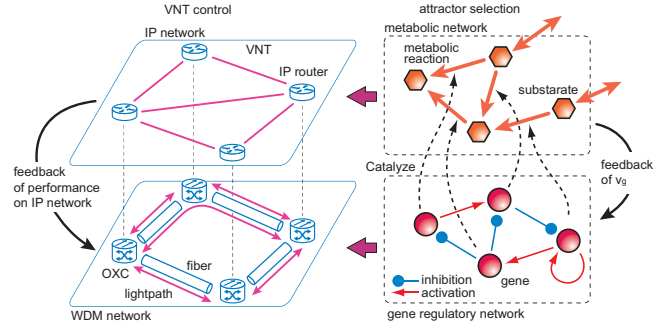


図1 遺伝子・代謝ネットワークと仮想網制御の対応

良くなるように仮想網を制御する。光パスを設定可能な全てのノードペア間、すなわち、光パス候補に対して生物モデルの遺伝子を対応付け、その遺伝子が互いに活性および抑制の相互作用を及ぼしながら、光パスを制御する。この光パスを制御する制御単位を以降も同様に遺伝子とする。

2.2 アトラクター選択を用いた仮想網制御のダイナミクス

はじめに、提案手法のダイナミクスを述べる。 i 番目の光パス l_i を制御する遺伝子 i は発現レベル x_i を持つ。この発現レベル x_i で光パスを制御する。発現レベル x_i の変化を以下の時間発展方程式で表す。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left(\varsigma \left(\sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta \quad (1)$$

$$\varsigma(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\mu z)} \quad (2)$$

α は仮想網の活性度であり、IP ネットワークのコンディションを示す指標である。 W_{ij} は制御行列であり、遺伝子 i と j の関係を示す。 η はゆらぎである。ここでは平均 0 のガウシアンノイズを用いる。

光パス l_i を設定するか否かは、発現レベル x_i の値によって判断する。式 (1) の関数 $\varsigma(z)$ の形状より、 x_i は厳密には 0、1 に収束せず $x_i \approx 0,1$ となる。そこで、閾値を 0.5 とし、 $x_i > 0.5$ のときに光パスを設定し、 $x_i \leq 0.5$ のときは光パスを設定しない。このように、アトラクター選択のダイナミクスをもとに光パスを制御し仮想網を構築する。 α が小さく、ゆらぎが優先的に動作を決定しているときには、物理ネットワーク上の資源に関する制約を満たさない場合がある。その場合は、光パスの ID の昇順に光パスを設定するものとする。

式 (1) の α は、IP ネットワークのコンディションを示す指標である。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 ネットワークから仮想網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 の容量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 $u_{\max} = \max_i u_i$ とする。 u_{\max} を用いて α を以下の通りに定義する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{\max} - \zeta))} \quad (3)$$

ここで、 γ 、 ζ 、 δ は定数である。活性度 α の値域は $[0, \gamma]$ となる。 α は ζ 付近で急激に 0 に近づき、そのときの傾きは δ に

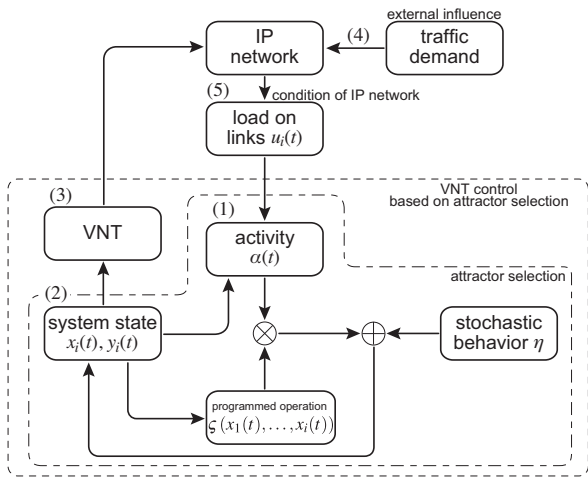


図2 アトラクター選択にもとづく仮想網制御の流れ

よって変化する。 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、上位ネットワークの性能が悪いと見なし、 α を急激に 0 に近づけ、ゆらぎにより仮想網制御は新たなアトラクターを探索する。一方、 u_{\max} が ζ よりも大きい場合は、上位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仮想網を制御する。

アトラクター選択を用いた仮想網制御は、ゆらぎ η とアトラクターを持つ制御構造 $\varsigma(\sum_j W_{ij}x_j - \theta) - x_i$ の 2 つの挙動を持ち、それらの挙動が活性度 α によって制御されている。IP ネットワークの最大リンク利用率が上昇した場合は α が低下する。そのため、式 (1) における η の影響が相対的に大きくなり、システムの状態 x_i はランダムに変化する。このとき、 x_i に応じて仮想網が再構成される。変動した環境に対して適切にトラヒックを収容可能な仮想網が構築されると、最大リンク利用率が低下する。これは、 α の増加として式 (1) にフィードバックされる。その結果、 x_i は再びアトラクターを持つ制御構造によって支配的に制御される。このように、アトラクター選択では α に応じ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ながら仮想網を再構成する。

アトラクター選択にもとづく仮想網制御の流れを図 2 に示す。ここでは、説明の都合上、それぞれの記号に制御のラウンド数 t を付与して説明する。はじめに、図 2 の (1) で、ラウンド t における現在の IP ネットワークの最大リンク利用率から活性度 $\alpha(t)$ を計算する。(2) で、式 (1) にしたがって、 $x_i(t)$ を計算する。この $x_i(t)$ を、(3) で仮想網に変換する。(4) でこの仮想網をネットワークに投入し、仮想網上にトラヒックが流れる。その結果、(5) でそれぞれの光パスのリンク利用率 $u_i(t)$ が決まる。この後、 $u_i(t)$ をもとに、再び (1) で活性度 $\alpha(t+1)$ を計算する。したがって、 $\alpha(t+1)$ は $x_i(t)$ を変換した仮想網の現在の環境に対する性能を表している。この値を式 (1) にフィードバックし、繰り返し仮想網を計算する。

次章以降では、本稿で拡張したアトラクター構造の定義方法およびアトラクター構造の動的再構成方法を説明する。

2.3 アトラクター構造の定義

提案手法の環境変化に対する適応性および適応するまでの時

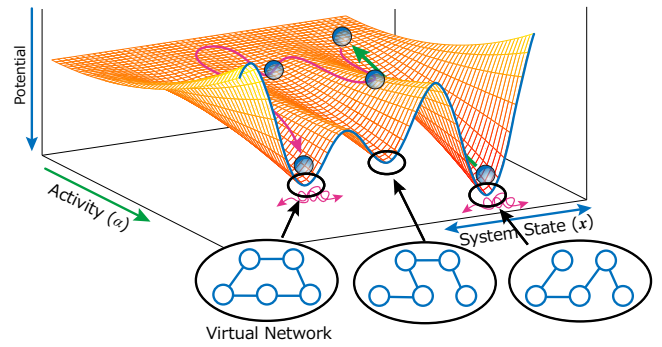


図3 アトラクター構造と仮想網の関係の概念図

間である収束時間は、アトラクター構造に大きく依存する。アトラクター構造の概念を図 3 に示す。図は、アトラクター選択の振る舞いを模式的に表現したものである。図の曲線は、式 (1) の $\varsigma(\sum_j W_{ij}x_j - \theta) - x_i$ をポテンシャル関数に変換した曲線を表現したものである。光パス候補数が n 本であるとする、本来は n 次元空間上の曲線となるが形式的に 1 次元で表現している。図中の球体はシステムの状態である n 次元ベクトル (x_1, \dots, x_n) を表している。図中に示したように、アトラクター選択では、ポテンシャル関数の安定な均衡点をアトラクターと呼ぶ。アトラクター選択は活性度により、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とみなすことができる。提案手法では、前述の通り、収束したアトラクターにおける (x_1, \dots, x_n) をもとに光パスを設定し仮想網を構築するため、それぞれのアトラクターは構築する仮想網の候補とみなすことができる。したがって、環境変化に適応するためには、式 (1) のアトラクター構造が適切なアトラクターを持つ必要がある。本稿では、 $\varsigma(\sum_j W_{ij}x_j - \theta) - x_i$ によるポテンシャル曲面、とりわけ、アトラクターの位置とアトラクターの数をアトラクター構造と呼ぶ。式 (1) の右辺第二項はアトラクターを持つ制御構造であり、この項の W_{ij} で式 (1) における x_i の均衡点であるアトラクターが決まる。そのため、式 (1) が適切なアトラクターを持つように、すなわち、構築する仮想網に対応する x_i がアトラクターになるように W_{ij} を決定する必要がある。

式 (1) は、ホップフィールドネットワークと構造が類似している [10, 11]。式 (1) の α は、収束速度を決める定数とみなすことができ、 η の平均は 0 であるため、 x_i の収束値は、時間発展方程式 $dx_i/dt = \varsigma(\sum_j W_{ij}x_j) - x_i$ によって決まる。この構造はホップフィールドネットワークと同一である。そこで、ホップフィールドネットワークの知見を応用して W_{ij} を決定する。ここで、解空間上にアトラクターとして保持する仮想網の集合を G 、仮想網 $g_k \in G$ に対応する発現レベルの組を $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ とする。このベクトル $\mathbf{x}^{(k)}$ を解空間上のアトラクターとして保持するために、文献 [12] で紹介されている、パターン直交化の方法を用いる。ここでは、 G の元である m 個の仮想網に対応する発現レベルのベクトル $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ を解空間上のアトラクターにする。ベクトル $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$

を行とする行列 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。

$$W = X^+ X, \quad (4)$$

ここで、 X^+ は X の疑似逆行列である。パターン直交化を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。ただし、我々の提案手法では、ヘブ則 [11] などよりシンプルな方法を用いることも可能である。

これにより、仮想網 $g_k \in G$ が式 (1) のアトラクターとなる。このように、構成したい仮想網の候補がアトラクターとなるようになり、出力される仮想網を指定してアトラクター選択を駆動することが可能になる。ただし、これだけでは、提案手法は想定した仮想網を出力するのみであり、環境変化に適応的に仮想網を構築できるとは言えない。次章ではアトラクター構造の動的再構成による環境変化に対する適応性の実現方法を説明する。

2.4 アトラクター構造の動的再構成

式 (4) によって制御行列を定義した場合、式 (1) によって出力される仮想網は、制御行列の定義に用いた仮想網 $g_s \in G$ のいずれかである。そこで、環境変化に対する適応性および高速なアトラクターへの収束を実現するために、動的に W_{ij} を更新し、現在の環境に適したアトラクターをアトラクター構造に組み込む。具体的には、ゆらぎで仮想網を構築しているときに、性能の良い仮想網が構築できた場合は、その仮想網を G に追加し、式 (4) により W_{ij} を再計算する。このように、動的にアトラクター構造を再構成することで、環境変化に対する適応性と高速なアトラクターへの収束を実現する。

ただし、ホップフィールドネットワークの知見から、アトラクター構造中に保持できるアトラクター数は遺伝子数（光パス候補数） n の約 15% 程度であることが分かっている [12]。このように、アトラクター構造が保持可能なアトラクター数には制限があるため、アトラクターの追加に加えて定義済みのアトラクターを削除する必要がある。ここでは、シンプルにアトラクター構造の定義に用いる仮想網を FIFO 形式で管理する。FIFO 形式が優れているかどうか、多様な環境変化に対する適応性を実現するための仮想網候補の管理方式の検討は今後の課題である。ここでは、新たに仮想網を追加した場合は、仮想網の集合 G に含まれる最も古い仮想網を削除する。この操作により更新したアトラクターの集合 G に対して式 (4) を用いて制御行列 W_{ij} を再計算する。

3. 実証実験

本章では、小規模な実験テストベッドネットワークで実施した実証実験の結果を述べる。

3.1 実験環境

アトラクター選択にもとづく仮想網制御をソフトウェアに実装し、構築した 5 ノードの実験ネットワークを用いて動作検証した。実験ネットワークは、IP ルーター 5 台と OXC 3 台で構成した。IP ルーターは、Juniper MX5/MX10 を、OXC は Glimmerglass System 100 を用いた。OXC は 1 台の Glimmer-

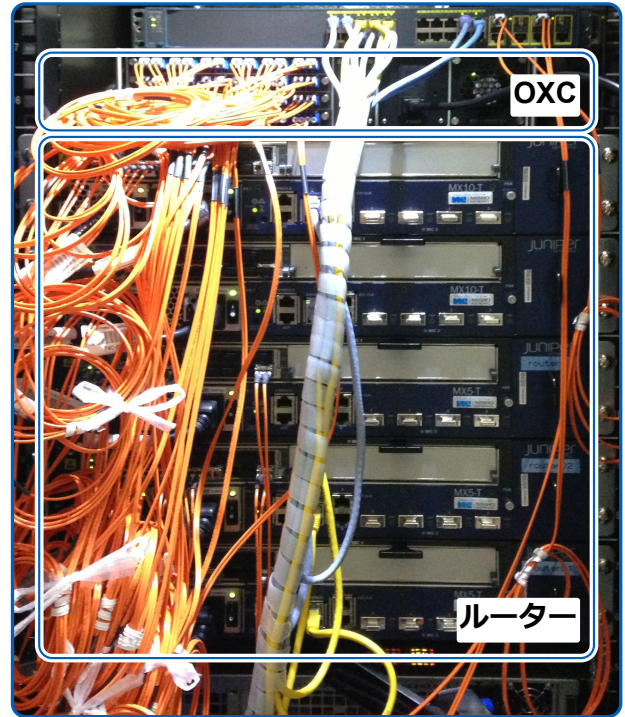


図4 実験ネットワーク

glass System 100 を論理的に 3 台の OXC として用いている。ルーター間のインターフェースには 1000Base-LX である。そのため、光パスの帯域は 1 Gbps である。OXC で光シグナルをスイッチングすることで、ルーターのインターフェース間の接続を切り替える。この機材で構築した実験ネットワークを図 4 に、実験ネットワークの論理的構成図を図 5 に示す。

提案手法であるアトラクター選択にもとづく仮想網制御と、ネットワーク制御ソフトウェアを実装し、これらの機器を制御する。構築した仮想網上の IP ルーティングには、OSPF を利用し、光パスのルーティングには物理ネットワーク上の最短経路を用い、かつ、その経路は固定とした。ネットワークの最大リンク利用率を取得するために、それぞれのルーターから SNMP によってリンクのトラフィック量を取得する。実証実験では、最大リンク利用率を取得し、提案手法により仮想網を計算し、ネットワーク機器の設定を変更するという一連の手順を 1 分おきに実行する。

3.2 実験シナリオ

前章で述べた実験ネットワークのルーター 1 からルーター 3 に 3 台のホストを接続し、トラフィックを流す。このホスト間で流すトラフィック量を変化させることでトラフィック変動を発生させる。ルーター 1 からルーター 3 に接続したホストをそれぞれホスト 1 からホスト 3 とする。初期状態では図 6 に示すように光パスを設定しておく。この状態で、実験開始から 10 分後にホスト 2 からホスト 1 に、さらにその 5 分後にホスト 3 からホスト 1 に対して、400 Mbps の UDP フローを流す。本実験では、ホスト数の制限から、2 本のフローのみを扱う。時間を変えてトラフィック送信を開始することで、トラフィック変動を発生させる。これにより、実験開始から 10-15 分には、ルーター 2 か

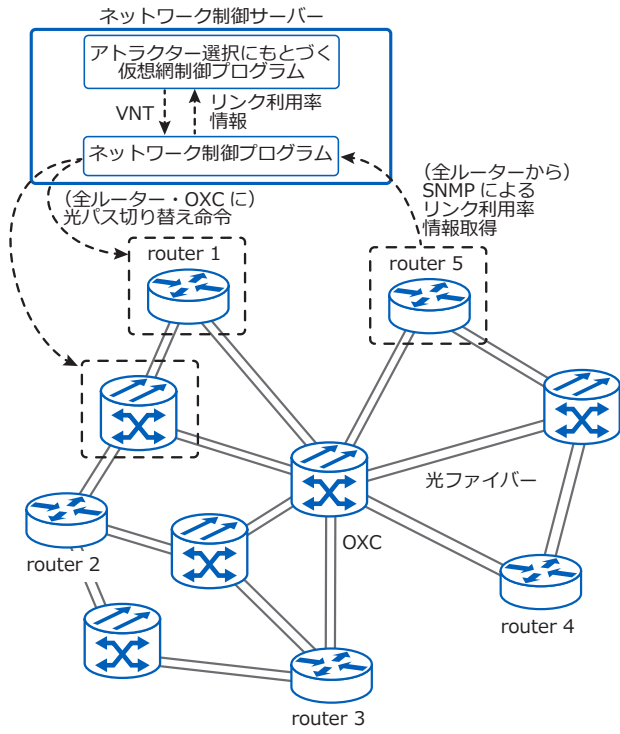


図5 実験機器の構成

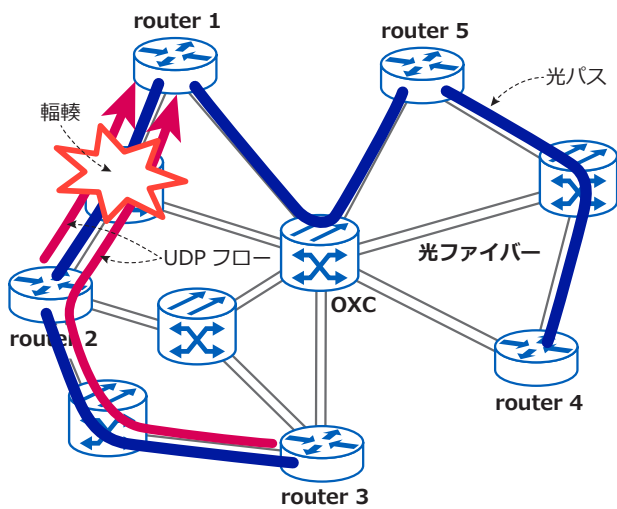


図6 初期仮想網構成と実験シナリオ

らルーター 1 への光パス上を流れるトラフィック量は 400 Mbps、すなわちリンク利用率が 0.4 になる。さらに、その 5 分後には 800 Mbps のトラフィックが流れ、リンク利用率が 0.8 になる。この段階でアトラクター選択にもとづく仮想網制御により仮想網の再構築を実施し、最大リンク利用率が低くなる仮想網を探索する。

3.3 実験結果

本章では、これまでに述べた実験環境で実施した実験結果の一例を示す。実験時の最大リンク利用率の時間変化を図 7 に示す。時刻 10 分後、15 分後の最大リンク利用率の変化は、前章で述べた通り、それぞれホスト 2、3 からのフロー送信開始によるものである。時刻 15 分後で最大リンク利用率が 0.8 付近に到達している。この後ゆらぎによる解（変動したトラフィックを

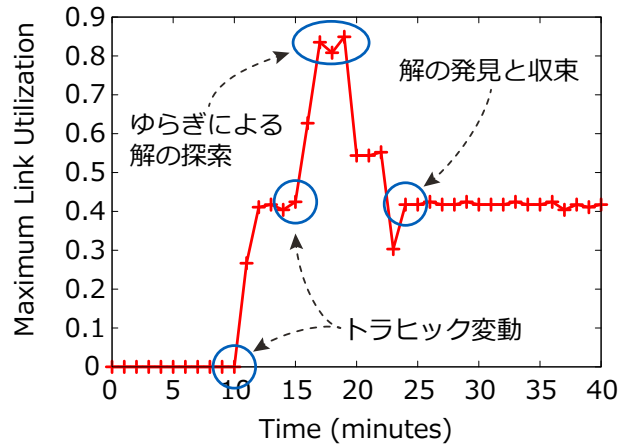


図7 最大リンク利用率の時間変化

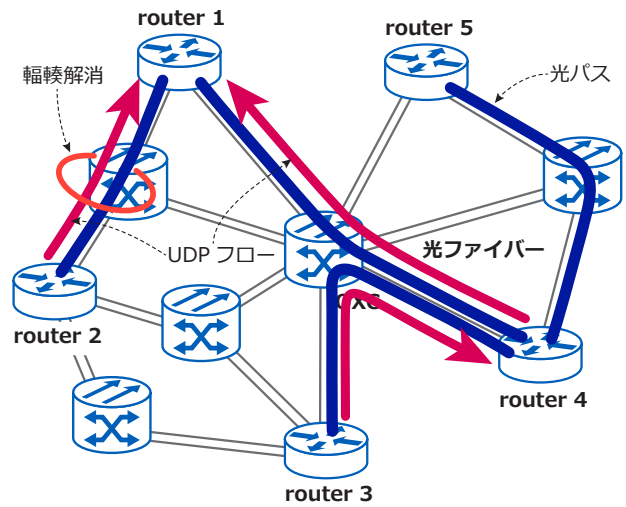


図8 トラフィック変動適応後の仮想網構成

収容可能な光パストポロジー) が探索され、アトラクター選択にもとづく仮想網制御で 6 回仮想網を再構築した後に、変動したトラフィックに適応し、最大リンク利用率が低くなる仮想網が構築されている。このときの実験ネットワークの状態、および構築された仮想網を図 8 に示す。他の実証実験の詳細な結果は割愛するが、全ての試行において、最大 10 回程度の仮想網再構築、すなわちトラフィック変動後 10 分以内でトラフィック変動に適応できることが分かった。以上より、小規模な実験ネットワークでは、提案手法が動作することが分かったと同時に、トラフィック変動に対して 10 分以内に適応できることが分かった。

4. おわりに

環境変化に対する適応性を備えた仮想網制御を実現することが重要である。我々は、これまでに、適応性を実現する手段として、生物の未知の変化に対する適応性をモデル化したアトラクター選択を用いた適応性を備えた仮想網制御を提案し、その適応性の高さを示してきた。本稿では、提案手法を実装し、構築した小規模な実験ネットワーク上で実証実験を実施した。実証実験により、小規模な実験ネットワークでは、提案手法が動

作ることが分かったと同時に、トラヒック変動に対して10分以内に適応できることが分かった。今後は、より大規模な実験ネットワーク上での動作検証をするとともに、トラヒック変動以外の環境変動が発生した場合も同様に適応的な制御が可能であるかを調査する。

謝 辞

本研究成果は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「脳や生体の動作原理に基づく光通信ネットワーク制御基盤に関する研究開発 (課題番号 166)」によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 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.
- [2] J. Comellas, R. Martinez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, "Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks," *IEEE Network Magazine*, vol. 17, pp. 22–27, Mar./Apr. 2003.
- [3] 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, 1996.
- [4] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840–851, June 1996.
- [5] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 2543–2553, Mar. 2005.
- [6] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "On the stability of virtual network topology control for overlay routing services," in *Proceedings of IEEE Fourth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems (IEEE Broadnets 2007)*, (Raleigh, NC, USA), pp. 810–819, Sept. 2007.
- [7] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.
- [8] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo, "Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection," *PLoS ONE*, vol. 1, p. e49, Dec. 2006.
- [9] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [10] R. Rojas, *Neural Networks: A Systematic Introduction*. Springer, 1996.
- [11] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, pp. 2554–2558, Apr. 1982.
- [12] Y. Baram, "Orthogonal patterns in binary neural networks," Technical Memorandum 100060, NASA, Mar. 1988.