

アトラクター選択にもとづく仮想網制御における 仮想網候補選定手法の提案と評価

大場斗士彦[†] 荒川 伸一[†] 小泉 佑揮[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

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

あらまし 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制御手法として、生物が未知の環境変化に適応する振る舞いをモデル化した、アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法を提案している。アトラクター選択にもとづく仮想網制御では、アトラクターとして保持するいずれかの仮想網候補が現在のトラフィックを収容可能であることが望ましいが、保持可能なアトラクター数には上限がある。そこで本稿では、アトラクター選択にもとづく仮想網制御において、アトラクターとして保持する仮想網候補の選定手法を提案する。提案手法では、仮想網候補をその特性によって分類し、各仮想網候補群から1つずつ仮想網候補を選出することで、多様なトラフィック変動に適応可能な仮想網候補を選定する。また、ネットワークのトポロジーを縮約することによって仮想網候補選定手法のスケラビリティを確保する手法も合わせて提案する。評価の結果、ランダムに光パスを設定することで仮想網候補を構築した場合と比較して、提案手法は最大リンク利用率をより低く抑えられる良好な仮想網候補を選定できることがわかった。

キーワード 波長分割多重、波長ルーティング、仮想網制御、アトラクター選択

Hierarchical design of an attractor structure with topological diversity for VNT control based on attractor selection

Toshihiko OHBA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Yuki KOIZUMI[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka
565-0871 Japan

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

Abstract Our research group has proposed a VNT control method that is adaptive to traffic changes. The method is based on a dynamical system, called attractor selection, that models behavior where living organisms adapt to unknown changes in their surrounding environments and recover their conditions. One of important things of our VNT control method is how to determine attractors, i.e., VNT candidates. However, since the number of VNT candidates is limited, it is important to give diversity of attractors so that various kinds of VNTs are searched by attractor selection. In this paper, we propose a method to decide the VNT candidates. Our approach prepares the VNT candidates which have a different bottleneck link (lightpath) each other. We propose a method which divides the network topology into clusters to decide the VNT candidates. Evaluation results show that the VNT candidates prepared by our method can suppress maximum link utilization than the VNT candidates prepared in a random manner.

Key words Wavelength Division Multiplexing, Wavelength Routed Network, VNT Control, Attractor Selection

1. はじめに

動画配信サービスやクラウドサービス等、インターネットを利用したサービスの発展によって、近年のインターネットではトラフィック量の増大やトラフィック需要の多様化が起こっている。

将来開発される新たなサービスの要件にも対応するため、新たなサービスが出現した時に既存サービスとの共存を実現する柔軟なリソース制御を有する基盤ネットワークを実現することが必要になる。

そのような次世代の基盤ネットワークとして、IP over WDM

ネットワークが有望視されている [1-4]。IP over WDM ネットワークは、図 1 に示すように波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) を用いた光基盤ネットワーク (以降、WDM ネットワーク) と IP(Internet Protocol) ネットワークの 2 つの層を持ち、WDM ネットワークは OXC(Optical Cross-Connect) と光ファイバーから構成される。IP over WDM ネットワークでは、WDM ネットワークの OXC を経由する IP ルータ間に波長チャネル (以降、光パス) を設定し、複数の光パスを用いて仮想的なトポロジーである仮想網 (VNT: Virtual Network Topology) を構築し、その仮想網上に IP トラフィックを収容する。IP トラフィックは、IP ルータに設置されたトランスミッターとレシーバー、光パスを介して転送される。トラフィック需要は時々刻々と変化するため、トラフィック需要に適した仮想網を随時構築する、すなわち仮想網制御を行う必要がある。

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仮想網上に収容するためのアプローチとして、オフライン型の仮想網制御手法が検討されている [5]。本アプローチでは、光基盤ネットワークに管理ノードを設置し、管理ノードに制御情報を集めて最適な仮想網を算出し再構成することで、仮想網を制御する。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仮想網を算出する時間も増大する。したがって、ネットワーク規模のスケラビリティの観点からは、従来の集中型の制御アプローチではなく、より少ない制御情報で適応的に仮想網を制御する制御アプローチを適用することが重要である。

我々の研究グループでは、トラフィック需要の変化に適応し、IP トラフィックを効率的に収容するための仮想網制御手法として、生物システムの未知の環境変化に適応する原理であるアトラクター選択にもとづく自己組織型仮想網制御手法を提案している [6]。本手法ではアトラクター選択モデルにおけるアトラクターは仮想網候補に相当し、制御システムは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。つまり、制御システムは通信需要の計測を必要とせず、仮想網上の通信品質のみを計測し、そのフィードバック値によって仮想網を制御する。急激な、もしくは未知のトラフィック変動などの環境変化に対してはゆらぎを主体として制御システムを駆動することで、制御システムの状態を自律的に探索し、環境変化に適応する。アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法により、トラフィック変動やノード障害などのネットワーク環境の変化に対しても適応的に動作すること [6]、およびより大きなトラフィック変動に対しても仮想網の最大リンク利用率が低減されることを明らかにしてきた [7]。

アトラクター選択にもとづく仮想網制御では、解空間上に保持するアトラクターを適切に選ぶことが重要な課題となる。その理由は、アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法では、仮想網は最終的にアトラクターに収束するため、アトラクターとして保持する仮想網候補のいずれかが現在の環境に適応できる解であることが望ましいが、解空間上に保持できるアトラクター数には上限があり [8]、全ての仮想網候補をアトラクターとして保持することは不可能であるためである。そこで、本稿ではその課題を解決するため、アトラクターとして保持する仮想網候補の選定手法を提案する。

本稿の構成は以下の通りである。2 章ではアトラクター選択にもとづく仮想網制御手法について述べ、3 章で仮想網候補選定手法を提案する。また、3 章で述べる仮想網候補選定手法は

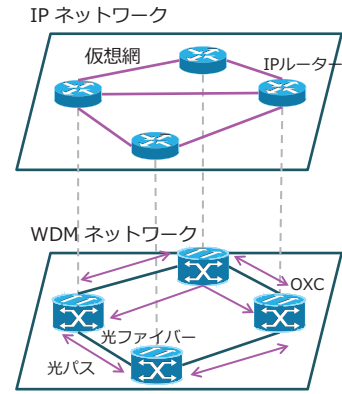


図 1 IP over WDM ネットワーク

計算時間の観点から小規模ネットワークを対象とした場合しか動作しないため、4 章で大規模ネットワークに適用可能な拡張手法を提案し、3,4 章の手法で選定した仮想網候補の性能評価について 5 章で述べる。6 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法

本章では、文献 [6, 7] で用いられているアトラクター選択にもとづく仮想網制御手法について述べる。なお本稿では、IP ルータ間のトラフィックは仮想網をトポロジーとして最短経路制御にもとづいて転送されるものとしている。以降では、仮想網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。

2.1 動作概要

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 [9]。アトラクター選択で駆動するシステムの振る舞いは、式 (1) で表される。

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

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ は、システムの状態である (n は状態変数の数)。この微分方程式により記述されるシステムは、2 つの挙動で構成される。1 つは、関数 $f(\mathbf{x})$ で表されるアトラクターを持つ制御構造であり、もう 1 つは η で表されるゆらぎ、すなわちランダムな振る舞いである。これら 2 つの挙動は、システムのコンディションを示す活性度 α で調整される。活性度はシステムのコンディションが良いほど大きな値になる。システムのコンディションが良く α が大きい場合は、 $f(\mathbf{x})$ がシステムの挙動に与える影響が η に比べて相対的に大きくなるため、 $f(\mathbf{x})$ が支配的にシステムを制御する。そのため、 \mathbf{x} は $f(\mathbf{x})$ で定義される解空間上の均衡点であるアトラクターに安定的に収束する。反対に、コンディションが悪く α が小さい場合は、 η が支配的にシステムを制御する。このとき、ゆらぎがランダムにシステムの状態を変化させ、システムのコンディションが良くなるアトラクターを探索する。このようにして、アトラクター選択システムは、活性度に応じてアトラクターを持つ制御構造とゆらぎを適切に使い分けることで、環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現している。

アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法では、システムの状態 \mathbf{x} を WDM ネットワークにおける仮想網の設定状況とし、システムのコンディションの良さを表す活性度 α として、IP ネットワークの通信品質を用いる。すなわち、WDM ネット

ワークはアトラクターを持つ制御構造とゆらぎによって駆動され、IP ネットワークの通信品質を示すフィードバック値によって制御される。これにより、生物におけるアトラクター選択と同様に、アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法はIP ネットワークからのフィードバックを用い、IP ネットワークの通信品質が良くなるように制御を行う。

2.2 活性度

IP ネットワークの性能指標として最大リンク利用率を用い、IP ネットワークから仮想網制御へフィードバックする活性度 α を決定する。光パス l_i の利用率 u_i は、 l_i を流れるトラヒック量を l_i のキャパシティで正規化した値とし、IP ネットワーク上の最大リンク利用率を $u_{max} = \max u_i$ とする。 u_{max} を用いて α を式 (2) のように定義する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (u_{max} - \theta))} \quad (2)$$

γ は定数であり、 α の値域は $[0, \gamma]$ となる。 θ 、 δ も定数であり、 α は θ 付近で急激に 0 に近づき、そのときの傾きをパラメーター δ によって定める。

2.3 光パスの設定方法

アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法では、光パス l_i の設定状況を状態変数 $x_i (\in \mathbf{x})$ の値によって定める。状態変数 x_i のダイナミクスは式 (3) で表される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left(\varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right) + \eta \quad (3)$$

第一項の $\varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$ は、アトラクターを持つ制御構造であり、式 (1) の $f(\mathbf{x})$ に相当する。関数 $\varsigma(z)$ はシグモイド関数 $\tanh(\frac{\mu}{2} z)$ である (μ はパラメーター)。このアトラクターを持つ制御構造は、すべての光パスの設定状況との相互作用によって決まり、その相互作用は制御行列 W_{ij} で表される。第二項の η はゆらぎ項である。

式 (3) により光パス l_i に対応する状態変数 x_i の値を算出し、 $x_i \geq 0$ である場合は光パス l_i を設定し、 $x_i < 0$ である場合は光パス l_i を削除する。

2.4 アトラクター構造の構築

式 (3) の第一項が有するアトラクター構造は、制御行列 W_{ij} によって定まる。制御行列 W_{ij} は、複数の仮想網候補をアトラクターとする。構築する仮想網候補を g_k とし、 g_k に対応する状態変数の組を $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ とし、 $\mathbf{x}^{(k)}$ をアトラクターがアトラクターとなるように制御行列を定義する。ここで、 m 個のアトラクターを記憶することを考える。 m 個のアトラクター $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ を各行とする行列を \mathbf{X} とすると、 $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ をアトラクターとする制御行列は式 (4) のように定義される。ここで、 \mathbf{X}^+ は \mathbf{X} の擬似逆行列である。

$$\mathbf{W} = \mathbf{X}^+ \mathbf{X} \quad (4)$$

3. 仮想網候補選定手法

3.1 仮想網候補選定に関する要件

アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法では、仮想網は最終的にアトラクターに収束するため、アトラクターとして保持する仮想網候補のいずれかが現在の環境に適応できる解であることが望ましい。しかし、仮想網候補の個数は 2^{n^2} 個 (n はノード数) と膨大であるのに対し、解空間上に保持できるアトラクター数には上限がある [8] (状態変数数の 10~15% 程度) ため、全ての仮想網候補をアトラクターとして保持することは

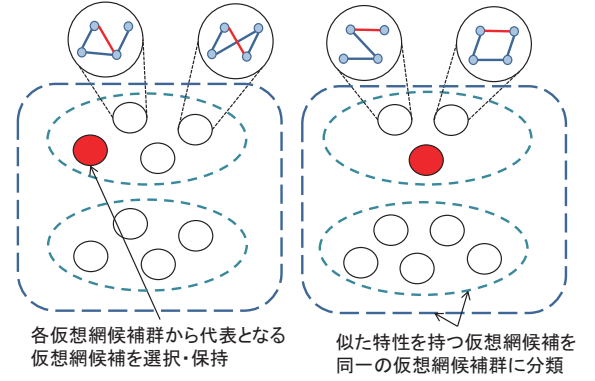


図2 アトラクターとして保持する仮想網候補の選定方針

不可能である。したがって、アトラクターとして保持する仮想網候補を適切に選定する問題は、 2^{n^2} 個の仮想網候補から、多様な $0.1n^2$ 個程度の仮想網候補を選択する問題に帰着する。そこで、仮想網候補の特性に着目し、図2のように仮想網候補をその特性をもとに分類し、各仮想網候補群から代表となる仮想網候補を選択することで、限られた個数でも多様性を持った仮想網候補を選定するアプローチを考える。

3.2 仮想網候補選定アルゴリズム

アトラクターとして保持する仮想網候補の選定方法の概要を以下に示す。

Step.1 ある程度の数の仮想網候補を列挙する。

Step.2 列挙した仮想網候補を、仮想網候補の特性をもとに仮想網候補群に分類する。

Step.3 各仮想網候補群から代表となる仮想網候補を選択し、それをアトラクターとして保持する。

以下ではそれぞれの手順について、詳細に説明する。

Step.1 仮想網候補の列挙

仮想網候補の個数は 2^{n^2} 個と膨大であり、全ての候補を対象にアトラクターとして保持する仮想網候補を選定するのは困難であるため、予めある程度の個数に絞り込んだ仮想網候補を対象にアトラクターとして保持する仮想網候補を選定することを考える。具体的には、ある仮想網 g_i をベースとし、その同型 (isomorphic) の仮想網候補を列挙することで、 2^{n^2} 個の仮想網候補から最大で $n!$ 個の仮想網候補に絞り込む。ここでは、あるトラヒックマトリクス T_i をもとに、ヒューリスティックな手法により T_i を収容可能な仮想網 g_i を算出し、 g_i の同型の仮想網候補を列挙する。 g_i は T_i を収容可能であるため、トラヒックが変動した場合でも、 g_i の同型のいずれかの仮想網候補で変動したトラヒックを収容できることが期待できる。この列挙した仮想網候補の集合を G とする。ただし、列挙した仮想網候補のうち物理ネットワークの資源の制約を満たさない仮想網候補は除去する。

Step.2 仮想網候補の分類

まず、仮想網候補集合 G に含まれる各仮想網候補をその特性をもとに分類する。アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法では、仮想網の性能指標として最大リンク利用率を用いている。最大のリンク利用率を示すリンクは、ボトルネック、すなわちトラヒックを流したときにリンク利用率が最大となるリンクである。また、辺を経由する最短経路数に相当する値である Edge Betweenness Centrality が高いリンクは、トラヒックを流したときにリンク利用率が高くなる可能性が高い。そこで、リンク利用率の推定値として利用できる Edge Betweenness

Centrality を用いて仮想網候補の分類を行う。このとき、異なる仮想網候補群に属する仮想網候補で、ボトルネックとなると推測されるリンク、すなわち Edge Betweenness Centrality が最大となるリンクは異なることが望ましい。そこで、Edge Betweenness Centrality が最大となるリンクが等しい仮想網候補を同一の仮想網候補群に分類する。ここで、

- $p = (s, d)$: 送信ノード s と宛先ノード d のペアの ID
- l_p : p のリンク (光パス)
- $C(g_i, l_p)$: 仮想網候補 g_i におけるリンク l_p の Edge Betweenness Centrality

の表記を用いて、光パス l_p がボトルネックとなると予測される仮想網候補群 G_p は式 (5) のように定義できる。

$$G_p = \{g_i | g_i \in G, C(g_i, l_p) = \max_q C(g_i, l_q)\} \quad (5)$$

これにより、仮想網候補集合 G を最大 n^2 個の仮想網候補群に分類することができる。

次に、仮想網候補群の数は最終的に $0.1n^2$ 個程度にする必要があるため、似た特性を持つ仮想網候補群 G_p を 1 つのより大きな仮想網候補群に併合する。ここでは、Degree Centrality が小さいノードに接続されたリンク間で負荷の相関が高いことを利用して仮想網候補群を併合する。あるノード a を中心に a を経由するトラフィックを考えると、リンク $l_{(s,a)}$ を流れるトラフィックの一部はリンク $l_{(a,d)}$ にも流れる。したがって、リンク $l_{(s,a)}$ がボトルネックリンクである場合、リンク $l_{(a,d)}$ も高負荷である可能性が高い。したがって、式 (5) で定義した仮想網候補群 $G_{(s,a)}$ と $G_{(a,d)}$ に属する仮想網候補は、あるトラフィックに対して同じリンクが高負荷になる可能性があるため、似た特性を持つと見做し、またノード s, d を直接接続するリンク $l_{(s,d)}$ がボトルネックである仮想網候補も似た特性を持つと見做せるので、式 (6) のように仮想網候補群を併合する。ノード a の Degree Centrality が小さいとき、リンク $l_{(s,a)}$ とリンク $l_{(a,d)}$ の負荷の相関が高いため、Degree Centrality が小さい順にノード a, s, d を選択する。式 (6) のように仮想網候補群を併合した後、 $G_{(s,d)} = G_{(s',d')}$ とする。これを仮想網候補群の個数が $0.1n^2$ 個程度となるまで繰り返す。

$$G_{(s',d')} = G_{(s,a)} \cup G_{(a,d)} \cup G_{(s,d)} \quad (6)$$

Step.3 仮想網候補群の代表となる仮想網の選択

各仮想網候補群から、代表となる仮想網候補を選択する。Edge Betweenness Centrality が小さいほど、トラフィックを流したときに最大リンク利用率がより低くなる可能性が高いため、各仮想網候補群から Edge Betweenness Centrality の最大値が最も小さい仮想網候補をその仮想網候補群の代表として選択し、アトラクターとして保持する。

4. トポロジーの縮約を用いた仮想網候補選定手法

4.1 仮想網候補選定アルゴリズムにおける課題

3. 章で述べた仮想網候補選定アルゴリズムは、大規模なネットワークを対象とした場合に動作しないという課題がある。その理由は、仮想網候補選定アルゴリズム Step.1 において、ベースとなる仮想網 g_i の同型の仮想網候補は $n!$ 個 (n はノード数) となるが、ノード数 n の増加に伴い同型の仮想網候補の個数が爆発的に増加するためである。そこで、計算量を削減しつつ多様な仮想網候補を選定するために、ネットワークのトポロジーを縮約した上で仮想網候補を列挙するアプローチを考える。具

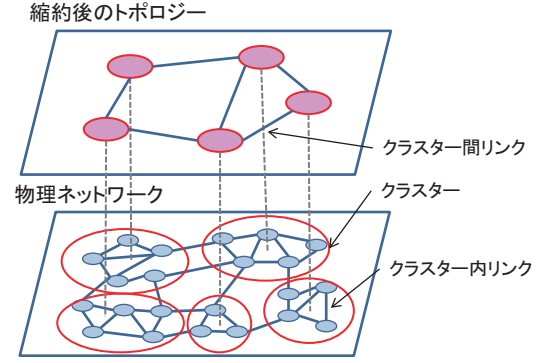


図3 トポロジーの縮約

体的には、図3のように対象とするネットワークを内部に数個のノードを持つクラスターに分割し、クラスターをノードと見做したトポロジーに縮約した上で、3. 章の仮想網候補選定アルゴリズムを適用することを考える。

4.2 トポロジーの縮約を用いた仮想網候補選定アルゴリズム

ネットワークトポロジーの縮約を利用した、アトラクターとして保持する仮想網候補の選定方法の概要を以下に示す。

Step.1 物理トポロジーをクラスターに分割する。クラスター数は c 個以下とし、クラスター内の頂点数が c より多い場合はクラスター内部を一つのトポロジーと見做し、再帰的にクラスターに分割する。

Step.2 最下位層のクラスター内は、スター型トポロジーを重畳した仮想網候補を複数個、あるいはフルメッシュ型トポロジーの仮想網候補を 1 個生成する。

Step.3 上層では、3. 章の仮想網候補選定アルゴリズムをベースに仮想網候補を生成する。

Step.4 各クラスター階層とその層のクラスター内の仮想網候補群を結合して、縮約前の物理トポロジーに対応する仮想網候補を完成させる。

以下では、それぞれの手順について詳細に説明する。

Step.1 物理トポロジーのクラスター分割

物理トポロジーを c 個以下のクラスターに分割する。クラスター内の頂点数が c より多い場合は、クラスター内部を一つのトポロジーと見做し、再帰的にクラスターに分割する。物理トポロジーのノード数を n 個、各層の平均頂点数を c 個とすると、 $\lceil \log n / \log c \rceil$ 層の階層的なクラスター構造になる。

Step.2 最下位層のクラスターにおける仮想網候補の生成

最下位層のクラスター内は、スター型トポロジーを重畳した仮想網候補を複数個生成する。このとき、クラスター内のトラフィック変動に対応できるように、任意のノード対について、いずれかの仮想網候補にはそのノード対間の光パスが含まれるようにする。さらに、ノードやリンクの障害時に迂回路が維持できるように、任意のノードはいずれかの仮想網候補のスターの中心になるようにする。 k 層目の i 番目のクラスターを C_i^k 、 C_i^k に属するノードの集合を V_i^k 、 C_i^k 内の仮想網候補群を G_i^k 、 $g \in G_i^k$ の中心ノードの集合を $S(g)$ とする。Step.2 は、 $\forall u, v \in V_i^k, u \neq v, \exists g \in G_i^k$ について、辺 $(u, v) \in E(g)$ を満たし、かつ、 $\forall v \in V_i^k, \exists g \in G_i^k$ について、 $v \in S(g)$ を満たすように G_i^k を決めることである。Step.1 では $|V_i^k| < c$ となるようにクラスター分割を行っており、クラスター内のノード数は高々 c であるため、高々 $\lceil c(c-1)/(2 \cdot \min(p_k, c-1)) \rceil$ 個の仮

想網候補を生成する。ただし、 p_k は k 層目で使用できるポート数である。

また、最下位層のクラスター内でポート数に余裕がある場合は、フルメッシュ型トポロジーの仮想網候補を 1 個生成する。

Step.3 上層における仮想網候補の生成

3. 章における仮想網候補選定アルゴリズムを踏襲し、多様な仮想網候補を列挙する。ただし、仮想網候補選定アルゴリズム Step.2 における仮想網候補群の併合は行わない。具体的には、以下のように上層のそれぞれのクラスター階層における仮想網候補を生成する。ここでは、光パスを双方向に設定することを想定し、 $c(c-1)/2$ 個の仮想網候補を生成する。その理由は、任意の 2 ノード間の単方向光パスをそれぞれ独立して設定することで最適化を図る必要はなく、可能な限り少ない数で多様な仮想網候補を選定することを目標としているためである。

Step.3-1 ある仮想網をベースとした同型 (isomorphic) な $c!$ 個の仮想網候補を列挙する。

Step.3-2 列挙した $c!$ 個の仮想網候補を、Edge Betweenness Centrality をもとに $c(c-1)/2$ 個の仮想網候補群に分割する。

Step.3-3 各仮想網候補群から代表となる仮想網候補を選択する。

Step.4 クラスター間の光パス接続

各クラスター階層とその層のクラスター内の仮想網候補群を結合して、縮約前の物理トポロジーに対応する仮想網候補を完成させる。具体的には、Step.3 において各クラスター階層で生成した仮想網候補のクラスター間光パスを、クラスター内のノードに接続する。クラスター間光パスは上層から順次設定するものとし、各層のクラスター間に設定される光パスの本数は l 本とする。クラスター間の特定の光パスにトラフィック負荷が集中するのを防ぐため、 k 層の x 番目のクラスターを C_x^k 、 C_x^k に属するノードの集合を V_x^k 、 C_i^k と C_j^k 間の光パス $l_{i,j}^k$ をクラスター内のノード $u \in V_i^k, v \in V_j^k$ と接続する確率を式 (7) のように定義し、この確率にしたがって $l_{i,j}^k$ をノード u, v 間に接続するかを決める。ただし、 k_u はノード u に接続された光パス数とする。

$$P_{u,v} = (k_u k_v)^{-1} \quad (7)$$

5. 性能評価

5 ノード、25 ノード、100 ノードのネットワークを対象とし、仮想網候補選定手法により選定した仮想網候補の性能評価を行う。5 ノードのネットワークに対しては 3. 章の、25 ノード、100 ノードのネットワークに対しては 4. 章の仮想網候補選定手法を適用する。

5.1 評価環境

5 ノードの物理ネットワークを対象としたとき、各ノードのポート数は 3 とする。ヒューリスティックな手法として I-MLTDA [10] を用い、ランダムなトラフィックをもとにベースとなる仮想網 g を算出する。3. 章の仮想網候補選定アルゴリズムに従い仮想網候補の列挙、仮想網候補の分類を行い、仮想網候補群の数が $0.1n^2$ 個程度、すなわち 3 個になるまで仮想網候補群を併合し、仮想網候補を 3 個選定する。

25 ノードの物理ネットワークを対象としたとき、各ノードのポート数は 10 とする。ここでは、図 4 のように、5 ノード \times 5 ノードの 2 層のクラスター構造を持つとする。クラスターをノードと見做した第 0 層トポロジーはノード数 5、ポート数 3 として Step.3 により算出した 7 個の仮想網候補とする。第 1 層のクラスター内トポロジーはフルメッシュ型トポロジーとす

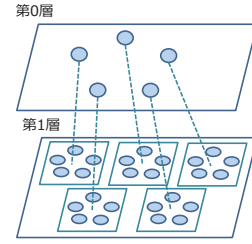


図 4 25 ノードネットワークのクラスター分割方法

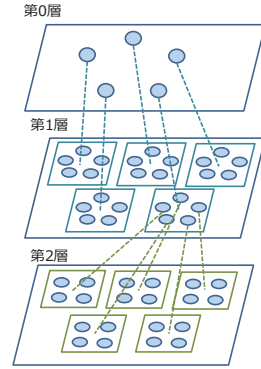


図 5 100 ノードネットワークのクラスター分割方法

る。第 1 層クラスター間は、第 0 層で接続されているときに光パスを 5 本設定する。第 0 層トポロジー 7 個、第 1 層トポロジー 1 個を上記のように接続し、仮想網候補を 7 個選定する。

100 ノードの物理ネットワークを対象としたとき、各ノードのポート数は 32 とする。ここでは図 5 のように、5 ノード \times 5 ノード \times 4 ノードの 3 層のクラスター構造を持つとする。クラスターをノードと見做した第 0 層トポロジー・第 1 層クラスター内トポロジーはノード数 5、ポート数 3 として Step.3 により算出した 7 個の仮想網候補とする。第 1 層トポロジーは、クラスター内トポロジーが 7 通り、クラスター数が 5 個であり、すべての組み合わせを考えると第 1 層トポロジー数が 7^5 個と爆発的に増加してしまうため、同一トポロジー内ではクラスター内トポロジーは同じものを使用する。すなわち、第 1 層トポロジーは 7 個とする。第 2 層のクラスター内トポロジーはフルメッシュ型トポロジーとする。第 1 層・第 2 層クラスター間は、上層トポロジーで接続されているときに光パスを 5 本設定する。第 0 層で接続されているとき第 1 層でクラスター間に光パスを 5 本設定し、第 1 層で接続されているとき第 2 層でクラスター間に光パスを 5 本設定するため、第 1 層クラスター間には 5^2 本、第 2 層クラスター間には 5 本の光パスが設定される。第 0 層トポロジー 7 個、第 1 層トポロジー 7 個、第 2 層トポロジー 1 個を上記のように接続し、仮想網候補を 49 個選定する。

トラフィックとして平均 1.5 偏差 0.5 の対数正規分布に従う乱数を 1000 パターン使用し、選定した仮想網候補がどの程度最大リンク利用率を抑えられるかを評価する。

比較手法は、ポート資源を使い切るまでランダムに選択したノード間に光パスを設定することで仮想網候補を構築するものとし、仮想網候補選定手法により選定した仮想網候補と同数の仮想網候補を算出する。比較手法により選定した仮想網候補には性能にばらつきがあるため、複数の仮想網候補集合を算出して比較する。

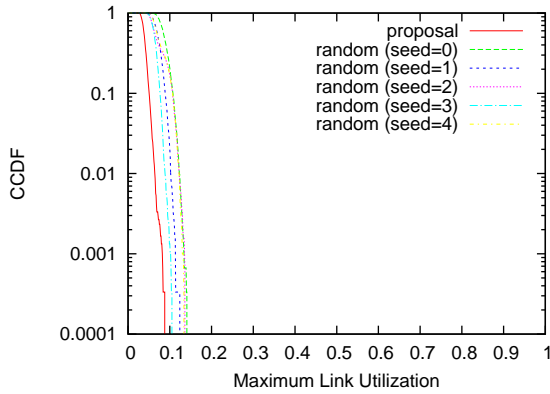


図6 最大リンク利用率の分布 (5 ノード)

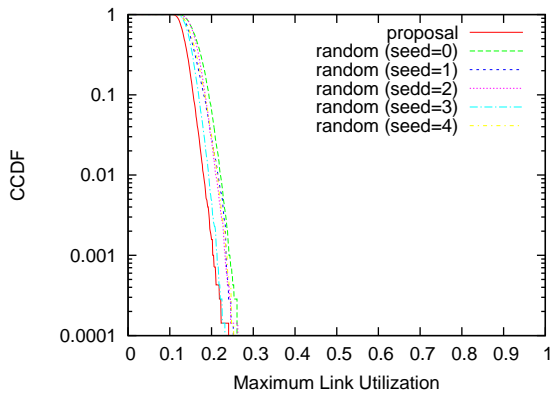


図7 最大リンク利用率の分布 (25 ノード)

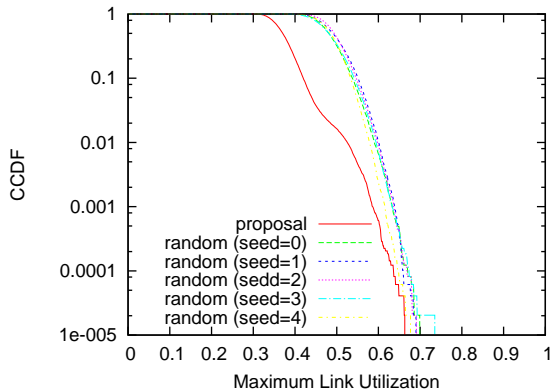


図8 最大リンク利用率の分布 (100 ノード)

5.2 評価結果

5 ノード、25 ノード、100 ノードのネットワークを対象に仮想網候補選定手法 (提案手法) により選定した仮想網候補と比較手法により選定した仮想網候補がそれぞれどの程度最大リンク利用率を抑えられるかを評価した結果をそれぞれ図6,7,8に示す。各図は、選定した仮想網候補にトラフィックを与えたときのすべての仮想網候補の最大リンク利用率の分布を相補累積分布関数により示している。各図を見ると、提案手法により選定した仮想網候補集合は、比較手法により選定したいずれの仮想網候補集合より、最大リンク利用率を全体として低く抑えられていることがわかる。したがって、全体として良好な仮想網候補が選定できる、すなわち最大リンク利用率をより低く抑えられる仮想網候補が選定できるという観点で、提案手法は有用であるといえる。

6. まとめと今後の課題

本稿では、アトラクター選択にもとづく仮想網制御において、アトラクターとして保持する仮想網候補の選定手法を提案し、ランダムに光パスを設定することで仮想網候補を構築した場合より、最大リンク利用率をより低く抑えられる良好な仮想網候補が選定できることを示した。

本稿では、ネットワークのクラスター分割の際に、クラスター内ノード数が均一になると想定して評価を行ったが、物理トポロジーを考慮してクラスター分割を行った際の手法の有効性を評価することが今後の課題として挙げられる。具体的には、クラスター分割方法として Louvain 法 [11] を用い、物理トポロジーの光ファイバー接続関係を考慮してクラスター分割を行うことを検討する。

謝辞

本研究の一部は NICT 委託研究「脳や主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」によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 83, no. 10, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [2] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 72–84, May 2000.
- [3] A. Soule, A. Nucci, R. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, "Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing changes," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 485–498, Jun. 2007.
- [4] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, pp. 177–189, Feb. 2010.
- [5] G. Agrawal and D. Medhi, "Lightpath topology configuration for wavelength-routed IP/MPLS networks for time-dependent traffic," in *Proceedings of GLOBECOM*, Nov. 2006, pp. 1–5.
- [6] 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, no. 11, pp. 1720–1731, Jun. 2010.
- [7] Y. Minami, S. Arakawa, Y. Koizumi, T. Miyamura, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control in WDM-based optical networks," in *Proceedings of INTERNET*, Sep. 2010, pp. 49–54.
- [8] Y. Baram, "Orthogonal patterns in binary neural networks," *NASA Technical Memorandum 100060*, Mar. 1988.
- [9] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, no. 1, p. e3, Jan. 2008.
- [10] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 8, no. 5, pp. 598–607, Oct. 2000.
- [11] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, and E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2008, no. 10, p. P10008, Oct. 2008.