

少数のパスの再構成で予測困難な環境変動に適応可能な仮想ネットワーク構成に関する検討

吉成 正泰[†] 大下 裕一[†] 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: †{m-yoshinari, y-ohsita, murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし クラウドストレージサービス等の様々なネットワークサービスが普及するにつれ、ネットワークを流れるトラフィック量やその時間変動が増大している。このような大容量で時間変化の大きなトラフィックを効率的に収容する方法として、光ネットワーク上に仮想ネットワークを構築し、仮想ネットワークを動的に再構成する手法が提案されている。仮想ネットワークを再構成する際には、再構成中もサービス品質を維持するために、再構成の影響を受けるトラフィックを可能な限り少なくすることが望ましい。しかしながら、構築された仮想ネットワークによっては、環境変動への対応に大規模な再構成が必要となる可能性がある。そこで、本稿では、環境変動に少数のパスの再構成で対応可能な仮想ネットワークが持つ特性を明らかにする。本稿では、環境変動に対応して進化する生物が持つ特徴に着想を得た、環境変動に少数のパスの再構成で対応可能な仮想ネットワークを判別可能な指標を提案する。シミュレーション評価により、少数のパスの再構成でトラフィック変動に対応可能な仮想ネットワークを提案した指標により判別できることを明らかにする。

キーワード トラフィック変動、トラフィックエンジニアリング、トポロジ、光ネットワーク、再構成

Virtual Network Topologies Adaptive to Large Environmental Changes by Reconfiguring a Small Number of Paths

Masahiro YOSHINARI[†], Yuichi OHSITA[†], and Masayuki MURATA[†]

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

Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †{m-yoshinari, y-ohsita, murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract A virtual network reconfiguration is one efficient approach to accommodate the traffic that changes significantly. By reconfiguring the virtual network, the network accommodates the traffic even when the traffic pattern changes significantly. The reconfigure has a large impact on the traffic passing the reconfigured paths. Thus, the number of reconfigured paths should be minimized. The number of reconfigured paths depends on the virtual network topology before the reconfiguration, and some topology requires a large number of reconfigured paths to handle the traffic changes. In this paper, we investigate the virtual network topology which can handle significant traffic changes by reconfiguring only a small number of paths. To investigate the virtual network, we propose a metric based on the evolution model in the changing environments. We evaluate our metric through simulation, and clarify that our metric identifies the virtual network that can handle significant traffic changes by reconfiguring only a small number of paths.

Key words Traffic Engineering; Topology; Optical Network

1 はじめに

クラウドストレージサービス等のネットワークサービスの普

及に伴い、コアネットワークを流れるトラフィック量やその時間変化が増大している [1]。流量・時間変化ともに大きいトラフィックを適切に収容する技術として、光ネットワーク上に仮想ネッ

ネットワークを構築し、制御する手法に関する検討が進められている[2]~[4]。これらの手法では、光クロスコネクタ(OXC)と光ファイバで構築された光ネットワークにおいて、IPルータ間を光パスと呼ばれるパスで接続することにより、仮想ネットワークを構築する。そして、光パスを動的に追加・削除することにより、各時刻のトラヒックに適した仮想ネットワークを構築する。

仮想ネットワークを再構成する際には、再構成中もサービス品質を維持するために、再構成の影響を受けるトラヒックを可能な限り少なくすることが望ましい。しかしながら、構築された仮想ネットワークによっては、環境変動への対応に大規模な再構成が必要となる可能性がある。予測困難な環境変動が発生した際にも大規模な再構成が発生することを防ぐためには、いかなる環境変動に対しても、部分的な再構成のみで対応可能な仮想ネットワークをあらかじめ構築しておくことが有効であると考えられる。しかしながら、環境変動に部分的な再構成のみで対応可能な仮想ネットワークは明らかになっていない。

環境変動に部分的な再構成のみで対応可能な仮想ネットワークを明らかにするにあたり重要な指標として、媒介中心性[5]やリンク重要度[6],[7]が挙げられる。媒介中心性は、各リンクを経由する送信元・宛先間トラヒックの期待値を表す指標であり、リンク重要度は媒介中心性をリンクの帯域で割った指標である。仮想ネットワークの各論理リンクに対して、これらの値を求めることにより、当該仮想ネットワークでの輻輳の発生しやすさが分かる。しかしながら、これらの指標は、発生した輻輳を解消するために必要な再構成の大きさを示す指標ではなく、これらの指標を基準として仮想ネットワークを構成したとしても、環境変動時の再構成の規模を小さく抑えることができるとは限らない。

本稿では、少数のパスの再構成で環境変動に対応可能な仮想ネットワークを持つ特性を明らかにする。本稿では、著しい環境変動が起きた際に生存・進化を行う生物の持つ特性に着目し、環境変動発生時の生物の進化のモデルを仮想ネットワークに適用し、環境変動に少数のパスの再構成で対応可能な仮想ネットワークを判別することが可能な指標を提案する。

以降、2章では、著しい環境変動が発生した際にも生存・進化可能な生物が持つ特徴を述べ、それを元に仮想ネットワークの環境変動への対応可能性を示す指標を提案する。3章では、提案した指標の有効性を示すための、評価方法について述べる。4章では、3章の方法に従ったシミュレーションの結果を示す。最後に、5章で、まとめ及び今後の課題について述べる。

2 環境変動への耐性とモジュール度

2.1 生物の生存と進化における環境変動とモジュール度

著しい環境変動が発生した場合の生物の生存・進化について研究が進められている。文献[8]では、図1に示されるように、各生物を、環境に存在する複数のリソースを合成し、生存に必要な複数の物質を生成するという機能を持つものとしてモデル化している。そして、生存に必要な物質を十分に生成できない固体は死滅し、生成可能な固体は増殖・進化する。文献[8]ではこのモデルを用いて、生物の生存・進化についてのシミュレー

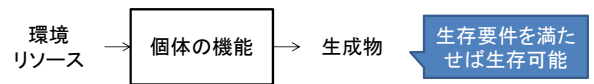


図 1: 生物モデル

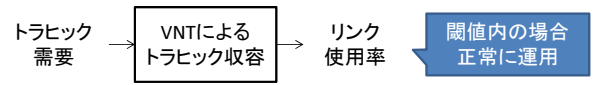


図 2: 仮想ネットワークのフローモデル

ションを行い、環境変動が著しい場合に生存・進化を行ってきた生物の持つ機能の特徴を調査している。

文献[8]では、生物の持つ機能の特徴のうち、機能間の関連に着目している。ここで、生物の機能は、各リソースをもとに、特定の物質の生成を行う、あるいは、生成を阻害する小機能に分割できるものとし、同一のリソースをもとにした小機能や、同一の物質の生成・阻害を行う小機能は関連があるものとする。そして、関連がある小機能をグループにまとめた結果、生成されたグループ数をモジュール度として定義すると、環境変動が著しい場合に、モジュール度が高い生物ほど生き残り、モジュール度が高くなるように生物が進化していくことが明らかになっている。

2.2 仮想ネットワーク制御における環境変動とモジュール度

著しい環境変動が生じた場合、モジュール度が高く、機能間の結びつきが強い構造を持つ生物が生存する。そのため、仮想ネットワークにおいても、特定の機能間の結びつきが強い構造を持つ仮想ネットワークが、著しい環境変化が生じた場合にも、生存・進化可能であると考えられる。そこで、本節では、この環境変動に耐性を持つ生物が持つ特徴をもとに、仮想ネットワークの環境変動への耐性を示す指標として、仮想ネットワークの機能が持つモジュール度を提案する。

2.2.1 ネットワークにおける機能

仮想ネットワークの機能は、トラヒックを収容することである。図2に、仮想ネットワークの持つトラヒック収容という機能のモデルを示す。このモデルでは、あるトラヒック需要が存在し、仮想ネットワークがトラヒック需要をリンクに割り当てることで、収容を行う。この時、リンク使用率が閾値の範囲内に収まれば、仮想ネットワークによるトラヒック収容が適切に行われており、正常な運用がされているとみなす。

図2におけるトラヒック需要は、図1におけるリソースに対応し、図2におけるリンク使用率は、図1の生成物に対応する。そして、十分なリンク使用率が達成できず、適切なトラヒックの収容ができない場合は、図1のモデルにおける生物の死滅と対応し、十分なリンク使用率が達成できる場合は、図1のモデルにおける生物の生存に対応する。

このように、図2の仮想ネットワークの持つ機能のモデルは、生物の持つ機能のモデルと対応する。そのため、仮想ネットワークが持つ機能のモジュール度が高ければ、その仮想ネットワークトポロジは、環境変動時により少ないパスの再構成で新たなトラヒック需要に対応できると考えられる。

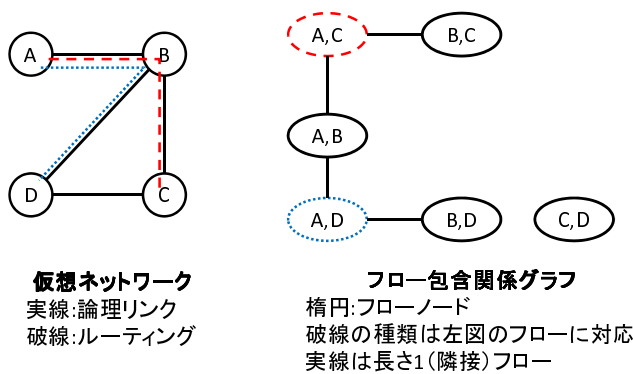


図 3: フロー包含関係モデル

2.2.2 仮想ネットワークの機能間の関係

仮想ネットワークが持つ機能のモジュール度を定義するにあたり、仮想ネットワークが持つ小機能同士の関係性を定義する必要がある。本稿では、仮想ネットワークの機能は、各フローを収用するという小機能に分割できるものとし、その小機能同士の関係性を定義する。

本稿では、各フローを収用する機能間の関係として、フロー包含関係を定義する。ここで、フロー包含関係とは、フロー A が収容される仮想ネットワーク上の経路集合が、フロー B が収容される経路集合の部分集合である場合、フロー A とフロー B が包含関係にある、と定義した関係である。フロー包含関係を持つフローを収用する機能同士は密な関係があり、あるフローのトラヒック量が急増し輻輳が発生した場合、そのフローとフロー包含関係にあるフローも輻輳したリンクを経由する。また、輻輳の解消のために、あるフローの経路を変更した場合にも、フロー包含関係にある別のフローが経由している輻輳箇所も解消できる可能性がある。

図 3 に示されるように、フロー包含関係は、各フローを頂点とし、フロー包含関係を持つフロー同士を辺で結んだグラフとして表すことができる。以降、フロー包含関係を表したグラフをフロー包含関係グラフと呼び、フロー包含関係グラフの頂点をフローノードと呼ぶ。

2.2.3 フロー包含関係モジュール度

文献 [8] の議論を適用すると、仮想ネットワークにおけるフローを収用する機能を、関連が強い小機能をまとめたグループに多数分割できる場合、当該仮想ネットワークは、環境変動への耐性が高いと考えられる。本稿では、フロー包含関係グラフをもとに、グラフに対するモジュール分割手法 [9] を適用する。そして、フロー包含関係グラフのモジュール度を求め、その指標が環境変動への耐性を示すかを検証する。以降、フロー包含関係グラフのモジュール度をフロー包含関係モジュール度と呼ぶ。

グラフのモジュール度 Q は、式 1 で定義される。

$$Q = \sum_{g \in G} \left[\frac{1}{2m} \sum_{i,j \in N_g} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \right] \quad (1)$$

但し、 A_{ij} はノード i とノード j の間の辺の数、 k_i はノード i

の次数、 $m = \frac{1}{2} \sum_i k_i$ は辺の数の合計、 G はモジュールの集合、 N_g はモジュール $g \in G$ に含まれるノードの集合である。

式 1 において、 $\frac{k_i k_j}{2m}$ は同一ノードの次数のランダムネットワークにおけるグループ内の辺の合計の期待値となる。 $\sum_{ij} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right)$ は、グループに含まれる辺の数から、同一ノード次数のランダムネットワークに含まれる辺の期待値を減算した値である。そして、 Q は、係数 $\frac{1}{2m}$ を乗じることによって、最大値が 1 となるように正規化されており、モジュール度が 1 に近づくほど、モジュール内のリンクがより密で、モジュール間のリンクがより疎な構造となる。

文献 [9] では、与えられたネットワークを、モジュール度が高くなるように分割する方法についても提案している。この手法では、分割してもモジュール度が増加しなくなるまで、モジュール度が最も高くなるようなネットワークの二分分割を再帰的に行う。

本稿では、この手法をフロー包含関係グラフに適用し、モジュール度が最大となるような分割が行われた際の、フロー包含関係モジュール度を得る。得られたフロー包含関係モジュール度は、各フローを収用するというネットワークの機能を、機能同士の関係が密なグループに分割することができるのかを示す指標となる。

3 評価方法

3.1 評価の概要

本稿では、フロー包含関係モジュール度と環境変動に対応する際に必要な追加光パス数を評価する。本評価では、フロー包含関係モジュール度が異なる複数の初期仮想ネットワークを準備し、その初期仮想ネットワークにおけるフロー包含関係モジュール度を計算する。そして、ランダムに生成したトラヒックマトリクスを与え、発生した輻輳を解消するのに必要な光パスの追加・削除の本数を調べる。本評価では、各初期仮想ネットワークに対して、10 パタンのトラヒックを与える。

以降、本評価で用いた、初期仮想ネットワークの生成方法、トラヒックマトリクスの生成方法、仮想ネットワークの再構成手法の詳細について述べる。

3.2 初期仮想ネットワーク生成手法

フロー包含関係モジュール度に違いのある初期仮想ネットワークを生成するために、本稿では、文献 [10] の手法を用いて生成したトポロジを初期仮想ネットワークトポロジとして利用する。文献 [10] の手法では、段階的にノードを追加することによって、ネットワークトポロジを生成する。この手法では、まず、あらかじめ定められた数のグループを生成し、各グループに 1 個ずつノードを配置、それらがリング状になるように辺を追加する。そして、ネットワーク内のノードの数が目標数に達するまで、ノードと辺の追加を繰り返す。ノードを追加する際には、そのノードが所属するグループをランダムに選択したのちに、グループ内のランダムに選択したノードとの辺を追加する。その後、さらに確率 p で追加したノードが属さないグループをランダムに選択しそのグループ内のランダムなノードと追

加したノードとの間に辺を追加するか、確率 $(1 - p)$ で追加したノードが属するグループ内のランダムなノードと追加したノードとの間に辺を追加する。この手法では、 p の値に応じて多様なトポロジが生成される。

本稿では、ノード数を 49、グループ数を 5 とし、 $p = 0.00, 0.02, \dots, 1.00$ と 0.02 刻みで変更させたものを各 5 個、計 255 個の初期仮想ネットワークを生成する。

3.3 トラヒックマトリクス生成手法

本稿では、トラヒックマトリクスは、文献 [11] にもとづき、対数正規分布 ($\mu = 15.45, \sigma = 0.885$) に従う乱数として生成した。

3.4 再構成手法

本稿では、文献 [4] の仮想ネットワーク再構成手法を用いる。この手法は、仮想ネットワーク上の全リンク使用率が閾値 Th を下回るまで、光パスの追加を行う。

本稿では、再構成の影響を受けるフローを可能な限り少なくするため、再構成前の仮想ネットワークにおいてもリンク使用率が Th を上回るリンクを経由していないフローについては、光パスの追加後も経路を変更しないものとし、リンク使用率が Th を上回るリンクを経由しているフローの経路のみ、CSPF で定めるものとする。

また、文献 [4] の手法では、リンク使用率が閾値 Th を超えるリンクを経由しているフローのうち、もっともトラヒック量が大きいフローの送信元・宛先間に光パスを追加するが、本稿では、追加される光パス数をより少なく抑えるため、全送信元・宛先間のうち、当該箇所への光パスの追加が、もっともリンク使用率を削減することができる箇所に光パスを追加する。

以下に、本稿で用いた仮想ネットワーク再構成手法の手順を示す。

- (1) 元の仮想ネットワークに対して、新たなトラヒックマトリクスの収容を試みる。
- (2) 全ての論理リンクのリンク使用率を求め、その最大値 L を求める。
- (3) $L \leq Th$ なら再構成は終了。 $L > Th$ ならば 4 へ進む。
- (4) すべてのノードペアに対して、当該ペア間に論理リンクを追加した際の最大リンク使用率 L を求める。
- (5) 最も L の値が小さくなるようなノードペアに論理リンクを追加し、2 に戻る。

4 評価結果

4.1 フロー包含関係モジュール度と追加パス数の関係

再構成パス数の結果を縦軸に、初期仮想ネットワークのルーティング情報からフロー包含関係モジュール度を計算したものを横軸にとり、各仮想ネットワークの値をプロットしたグラフを図 4 に示す。ただし、プロットされたデータの内、黒丸は追加パス数の平均値、エラーバーは追加パス数の信頼区間 (1σ) を表す。図 4 より、リンク使用率が Th を上回るリンクがほとんど生じなかった 2 つの仮想ネットワークを除き、フロー包含関係モジュール度と追加パス数は負の相関関係があることが分かる。

これは、フロー包含関係グラフにおける特定モジュール内の

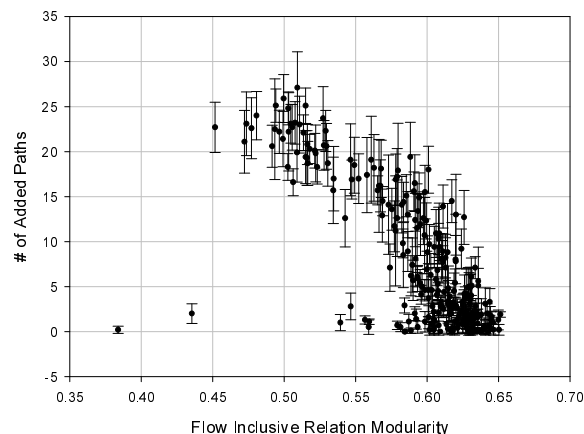


図 4: フロー包含関係モジュール度と追加パス数

フローが経由するリンクで発生した輻輳が、モジュール内の一部のフローの送信元・宛先間へのリンクの追加で解消されたことが原因であると考えられる。光パスを追加することによって、輻輳箇所を経由するフローが迂回される。迂回が発生すると、迂回されたフローが経由していたリンクにおける他のフローが利用できる帯域が増加し、当該リンクへのさらなる迂回が可能となる。

フロー包含関係モジュール度におけるモジュールは、同一の経路を経由するフローをまとめたものとなる。このモジュール内の関係が密であると、多くのフローが同一、あるいは、近隣のリンクを経由しているため、光パスの追加によるモジュール内のフローの迂回が、別の同一モジュール内のフローの迂回を可能とする確率が高い。その結果、少数の光パスの追加で、より多くのリンクの輻輳を解消できる。逆に、モジュール度が低いと、同一、あるいは近隣のリンクを経由するフローが少なく、多数の箇所の輻輳を解消するためには、より多くの光パスの追加が必要となる。

4.2 媒介中心性との比較

本節では、初期仮想ネットワークの各リンクの媒介中心性を計算し、その最大値を調べた。最大媒介中心性は、当該仮想ネットワークでの輻輳の発生しやすさを表す指標となる。最大媒介中心性を横軸にして仮想ネットワーク毎にプロットしたグラフを図 5 に示す。

図 5 において、最大媒介中心性が 0.4 未満の仮想ネットワークの傾向については、本評価で生成したトラヒック量が少なく、輻輳はほとんど発生していない。そのため、輻輳が発生した際のパスの追加数の比較に用いることはできない。

また、最大媒介中心性が 0.5 を超える仮想ネットワークでは、本評価で生成したトラヒックを与えた場合、多数のリンクで輻輳が発生しており、多くのパスの追加が必要となる。しかしながら、仮想ネットワークは、各時刻に流れているトラヒックを効率的に収容するように構築されるため、これらの少量のトラヒックでも輻輳が発生するような仮想ネットワークトポロジが構築されることは稀であると考えられる。

そこで、本稿では、最大媒介中心性が 0.4~0.5 の仮想ネットワークに注目する。最大媒介中心性が 0.4~0.5 の仮想ネット

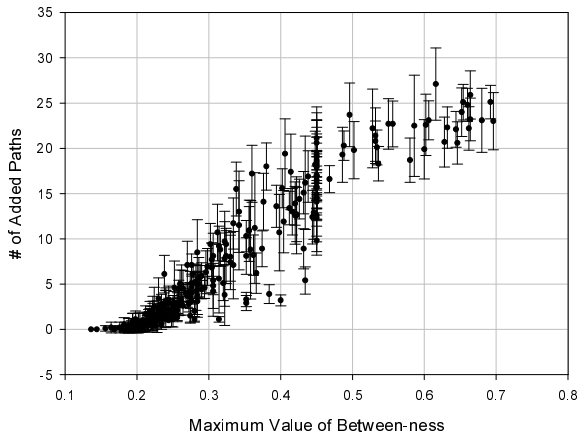


図 5: フロー包含関係モジュール度と追加パス数

ワークについて、両指標を横軸に、再構成パス数を縦軸にプロットしたグラフを図 6 に示す。図 6a 及び図 6b の両図を比較すると、図 6a には明らかな負の相関がみられるが、図 6b からは明確な相関はみられない。これは、フロー包含関係モジュール度は、あるフローの迂回により別のフローの迂回が可能となる点もとらえた指標となっているのに対して、最大媒介中心性は、パス追加によって発生する迂回の影響を考慮できていないためである。

4.3 偽陰性率及び偽陽性率を用いた評価結果

部分的な再構成で環境変動に対応可能な仮想ネットワークのフロー包含関係モジュール度による判別をより定量的に評価するために、本節では偽陰性率及び偽陽性率を用いた評価を行う。本稿では、偽陰性率 (FNR) を以下のように定義する。

$$FNR = m_{fn}/m_p$$

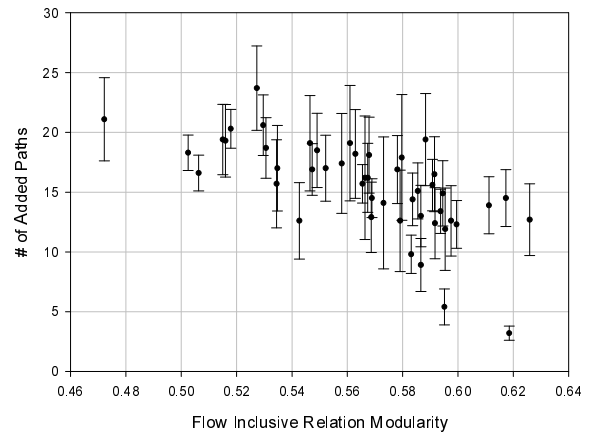
ただし、 m_p は平均再構成パス数 R が目標再構成パス数 R_{goal} 以下であるような仮想ネットワークの数、 m_{fn} は、そのうち、目標再構成パス数を上回ると判断された仮想ネットワークの数である。同様に、偽陽性率 (FPR) は、以下のように定義される。

$$FPR = m_{fp}/m_n$$

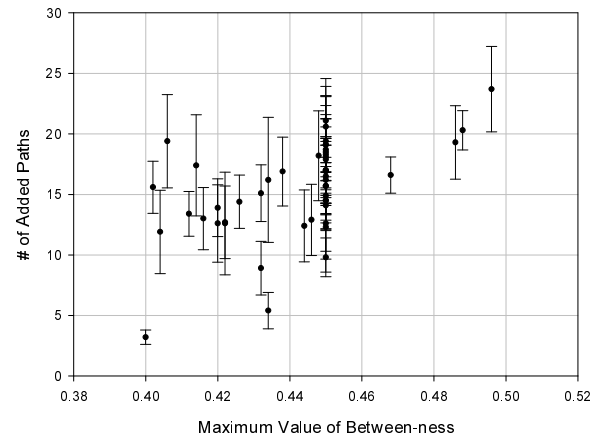
ただし、 m_n は、平均再構成パス数 R が目標再構成パス数 R_{goal} 以上であるような仮想ネットワークの個数、 m_{fp} は、そのうち、目標再構成パス数を下回ると判断された仮想ネットワークの個数である。

本節では、最大媒介中心性が 0.4~0.5 の仮想ネットワークを対象として、目標再構成パス数を下回るとみなす閾値を変化させながら、偽陰性率と偽陽性率を調べた。指標にフロー包含関係モジュール度を用いた際の偽陰性率と偽陽性率の関係をプロットしたグラフを図 7 に示す。但し、横軸は偽陰性率、縦軸は偽陽性率で、目標再構成パス数 $R_{goal} = 10$ とする。

また、同様に、最大媒介中心性が 0.4~0.5 の仮想ネットワークを対象として、最大媒介中心性を用いた際の偽陰性率と偽陽性率の関係をプロットしたグラフを図 8 に示す。但し、横軸は偽陰性率、縦軸は偽陽性率で、目標再構成パス数 $R_{goal} = 10$



(a) フロー包含関係モジュール度



(b) 最大媒介中心性

図 6: 最大媒介中心性が 0.4~0.5 の仮想ネットワークにおける両指標の部分的な比較

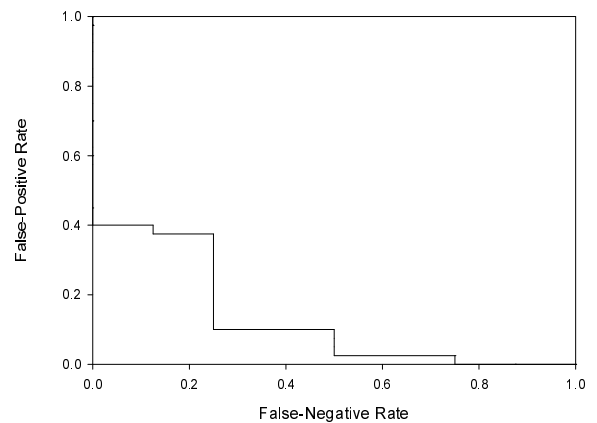


図 7: フロー包含関係モジュール度の偽陰性率と偽陽性率の関係

とする。

図 7 と図 8 を比較すると、偽陽性率を 0.1 程度に抑えたい場合、最大媒介中心性を指標として用いた場合は、偽陰性率を 0.6 程度にまでしか抑えることができない。しかし、フロー包含関係モジュール度を指標として用いた場合は、偽陰性率を 0.3 程度にまで抑えることが出来る。よって、フロー包含関係モジュール度の方が、より正確に、少数のパスの追加で環境変

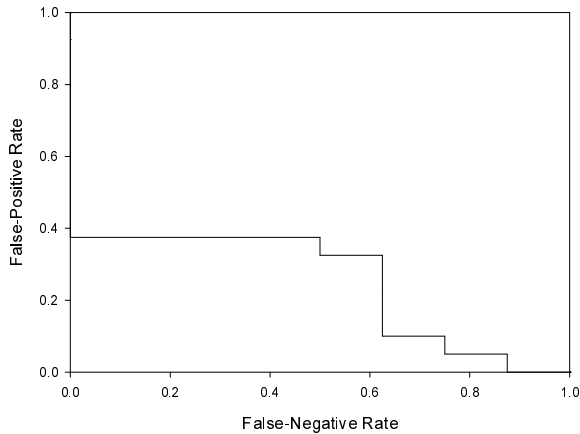


図 8: 最大媒介中心性の偽陰性率と偽陽性率の関係

動に対応可能な仮想ネットワークを識別することができる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、環境変動に大規模な再構成を行うことなく対応可能な、環境変動耐性を持つ仮想ネットワークを判別するための指標として、フロー包含関係モジュール度を提案した。フロー包含関係モジュール度と再構成パス数との関係の評価した結果、フロー包含関係モジュール度は、少数のパスの追加で環境変動に対応可能な仮想ネットワークを識別することができることが明らかとなった。今後の課題として、フロー包含関係モジュール度が高い仮想ネットワークを構築する手法の検討が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)23700077 によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 総務省, “情報通信白書 平成 24 年版,” 2012.
- [2] B. Ramamurthy and A. Ramakrishnan, “Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical wdm networks,” in *Global Telecommunications Conference, 2000. GLOBECOM '00. IEEE*, vol. 2, pp. 1269–1275 vol.2, 2000.
- [3] 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,” *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 18, pp. 177–189, feb. 2010.
- [4] A. Gençata and B. Mukherjee, “Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [5] L. C. Freeman, “A set of measures of centrality based on betweenness,” *Sociometry*, vol. 40, no. 1, pp. pp. 35–41, 1977.
- [6] A. Tizghadam and A. Leon-Garcia, “Autonomic traffic engineering for network robustness,” *IEEE J.Sel. A. Commun.*, vol. 28, pp. 39–50, January 2010.
- [7] A. Bigdeli, A. Tizghadam, and A. Leon-Garcia, “Comparison of network criticality, algebraic connectivity, and other graph metrics,” in *Proceedings of the 1st Annual Workshop on Simplifying Complex Network for Practitioners, SIMPLEX '09*, pp. 4:1–4:6, ACM, 2009.
- [8] H. Lipson, J. B. Pollack, and N. P. Suh, “On the origin of modular variation,” *Evolution*, vol. 56, pp. 1549–1556, Aug.

2002.

- [9] M. E. J. Newman, “Modularity and community structure in networks,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 103, pp. 8577–8582, June 2006.
- [10] N. Hidaka, “A topology design method for sustainable information networks,” Master’s thesis, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Feb. 2009.
- [11] I. Antoniou, V. V. Ivanov, V. V. Ivanov, and P. V. Zrelov, “On the log-normal distribution of network traffic,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 167, pp. 72 – 85, July 2002.