

クラウドコンピューティングを利用した 適応的トラフィックエンジニアリング手法の 有効性評価

柏崎 礼生^{†1} 高井 昌彰^{†2}

定点観測映像のような広域映像配信網において、災害による障害やオペレータの不在によって映像配信が中断することのない、耐障害性、自律性、そしてディペンダビリティが強く求められている。既存の手法では、大規模災害時に広範囲の複数のネットワークインフラストラクチャに障害が発生した場合においても頑強であるとは言い難い。また災害時に特有の外部トラフィックの増大によるクロストラフィックの回避をする事が困難である。この原因の一つとして、コントロールプレーンの計算能力が比較的矮小であるために複雑なトラフィックエンジニアリングが実現できない事が挙げられる。そこで本研究では各拠点におけるネットワーク情報をインターネットクラウド上の管理サービスに集約し、強大な計算機能を利用して離散イベント型シミュレータを行うことで、小～中規模のマルチホーム環境に適用可能なトラフィックエンジニアリングを実現する手法を提案する。提案手法はネットワークの送信元と送付先の組み合わせからなる経路の膨大な組み合わせに対して、ネットワーク情報の実測値を元に評価計算を行い適切な経路を適用する手法である。本提案手法の実時間対応性をシミュレータを用いて評価を行い、その有効性を示す。

An Effectiveness Evaluation for an Adaptive Traffic Engineering Method with Cloud Computing.

HIROKI KASHIWAZAKI^{†1} and YOSHIKI TAKAI^{†2}

Disaster tolerance, autonomy and dependability is strongly desired in broad area movie delivery network such as fixed-point observation. Any conventional methods aren't said to robust especially in large scale natural disaster like major earthquakes. And also it is hard to handle the huge traffic demands and avoid cross traffic and traffic congestion. We think the one reason of this difficulty is that a control plane which constructs routing table and an user plane which transmits packets are conglutinated, not set apart in the network routers. A processing power of a control plane is comparatively poorer than the power of high-end processor of late. So conventional router can't realize high quality traffic engineering. Now we propose an adaptive traffic engineering method for small or middle scale multihome network environments which uses a discrete event simulation with cloud computing. This method searches suboptimal paths combination from the enormous combinations of paths determined from the pairs of all source node and all destination node. This method is tested with ns-2 simulator and the results show the high speed performance of searching suboptimal solution.

1. 背景と目的

大規模災害により定点観測網が機能しなくなることは極めて深刻な問題である。そのため広域映像伝送網においてはネットワーク障害による伝送の不通を生じせしめない高い耐障害性と、ネットワーク運用者の不在によって配信が中断することのない自律性が求め

られる。しかし広範囲の複数拠点のインフラストラクチャに障害が発生した場合においてもディペンダビリティを実現するシステムを構築することは、既存の手法では困難である。拠点が複数の互いに独立したネットワーク回線を有することが容易になった現在においては、異なるトラフィック要求をネットワーク回線ごとに適切に振り分ける配送経路の組み合わせを設定することが求められる。拠点到接続された各回線は、映像伝送以外のアプリケーションでも利用されているため、各拠点で発生するトラフィック要求量と同時に、各回線が実際に許容可能なトラフィック要求量を正確

^{†1} 東京藝術大学 芸術情報センター

Art Media Center, Tokyo University of the Arts

^{†2} 北海道大学 情報基盤センター

Hokkaido University Information Initiative Center

に把握する必要がある．このように複数の制約条件が与えられた充足問題を解決する必要があるため，トラフィック要求量の増大と障害の発生を同時に解決することが難しい．自律的な運用のためにも各拠点がトラフィック要求に対する配送経路の組み替えを意識することなく複数のネットワーク回線を利用することができ，トラフィック要求を適応的に各回線に配分することでネットワーク資源を有効利用するトラフィックエンジニアリング (Traffic Engineering, 以下 TE)¹⁾ 手法が求められている．クラウドコンピューティングの台頭により強大な処理能力を安価にリアルタイムで利用することが可能となった現在において，TE 手法は単にトラフィック要求を分散させるだけでなく，計測されたネットワーク情報に応じて自律的な経路組み替えを実現することが可能となっている．ネットワークシミュレータを用いれば映像の通信品質に影響を及ぼすパケット損失率やインタラクションの応答性能に影響を及ぼす総遅延時間を高い精度で見積もる事ができ，これを用いることで多様なトラフィック要求に対して細やかな制御を実現することができる．

従来の TE 手法は，計測されたネットワーク情報の累計からトラフィック要求量の最大値を見積もりトラフィックの配分を行うオフライン方式と，実トラフィックから計測された情報をもとにリアルタイムにトラフィックの配分を行うオンライン方式とに分けられる²⁾．映像配送においては拠点間を結ぶネットワーク回線の利用可能帯域をリアルタイムに検出する必要があるため，本研究ではオンライン方式の TE 手法を採用する．オンライン手法の TE 手法としては同一組織内のバックボーンにおける MPLS-TE が実運用で利用されているが³⁾，広域に分散した不均一なネットワークを結ぶ手法として採用することは難しい．計測されたネットワーク情報に基づいて OSPF や BGP のパラメータをリアルタイムで調整する手法も提案されているが⁴⁾⁵⁾，拠点間が複数のネットワーク回線で接続されている環境においては，既存の経路制御アルゴリズムで柔軟なトラフィック配分を実現することは困難である．トラフィック要求の配分を細かい粒度で実現する方法として，パケット単位での配分を行う手法が挙げられるが⁶⁾，リオーダーリングの低減やループの回避が必要である⁷⁾．FEC を用いてデータを冗長化し，受信側で復号することで対応する手法も提案されているが⁸⁾，拠点数が増えるにつれて符号・復号に要する計算量も増大するため，本研究が想定する多対多の高精細映像配送での問題解決が難しい．

本研究ではネットワークポリシーの異なる複数拠点間で柔軟にリアルタイム性のある TE を実現するため，広域に分散配置された 10 箇所程度の拠点間において高精細映像をオーバーレイルーティングで配送することを対象とし，多様なトラフィック要求を各ネットワーク回線に適応的に配分する経路組み合わせの探索および

組み替え手法を提案する．シミュレーション実験により，運用上支障のない現実的な時間内でパケット損失や総遅延時間を低減させる経路の組み合わせの探索及び組み換えを行うことができることを示す．

2. フレームワーク

本論文の TE 手法は，複数の拠点が，1 つ以上の互いに独立したネットワーク回線で接続されたオーバーレイネットワークを対象とする．トポロジが公知である学術ネットワークや研究用テストベッドにおいてはその情報を用い，またトポロジが公知でない商用ネットワークにおいては遅延計測によるトポロジの推定を行い⁹⁾，これらのトポロジ情報を重畳させて各拠点間を結ぶ全てのネットワーク回線のトポロジを 1 つの多重有向グラフで表す (図 1)．

オーバーレイネットワークにおいて適応経路制御 (Adaptive Routing: AR) を実現するため，各拠点のゲートウェイに AR ルータを設置し，各ネットワーク回線を接続する．AR ルータはオーバーレイルーティング機能に加え，隣接拠点との片方向遅延時間，パケット損失率，利用可能帯域及び他拠点へのトラフィック要求量の計測を行う機能を有している．AR ルータは拠点を結ぶネットワーク間でのトラフィック要求に対してのみオーバーレイルーティングを行う．

経路組み合わせの評価計算や経路の組み替えを AR ルータに広告する管理サービスをオーバーレイネットワークから分離するために，管理サービスの機能はインターネット上のクラウドで実装するものとする．経路組み合わせの評価計算は，予めスケジュールされたトラフィック要求が発生する一定時間前に行い，輻輳を低減する経路に組み替える．また，この評価計算はパケット損失率の上昇を検知した際にも行われる．AR ルータによるネットワーク情報の収集から経路の組み替えまでの流れを以下に示す．

- (1) 各拠点の AR ノードは計測したネットワーク情報を定期的にクラウド上にある管理サービスに送信する．
- (2) 予約されたトラフィック要求が発生する一定時間前，あるいは指定した閾値を超えるパケット損失率が計測された時点で，管理サービスは経路組み合わせの評価計算を開始し，パケット損失率を改善できる経路を探索する．
- (3) パケット損失率と総遅延時間を改善できる経路が発見されると，管理サービスは全ての拠点の AR ルータに経路の更新をアナウンスし，AR ルータは新しい経路組み合わせに従って拠点間のオーバーレイルーティングを行う．

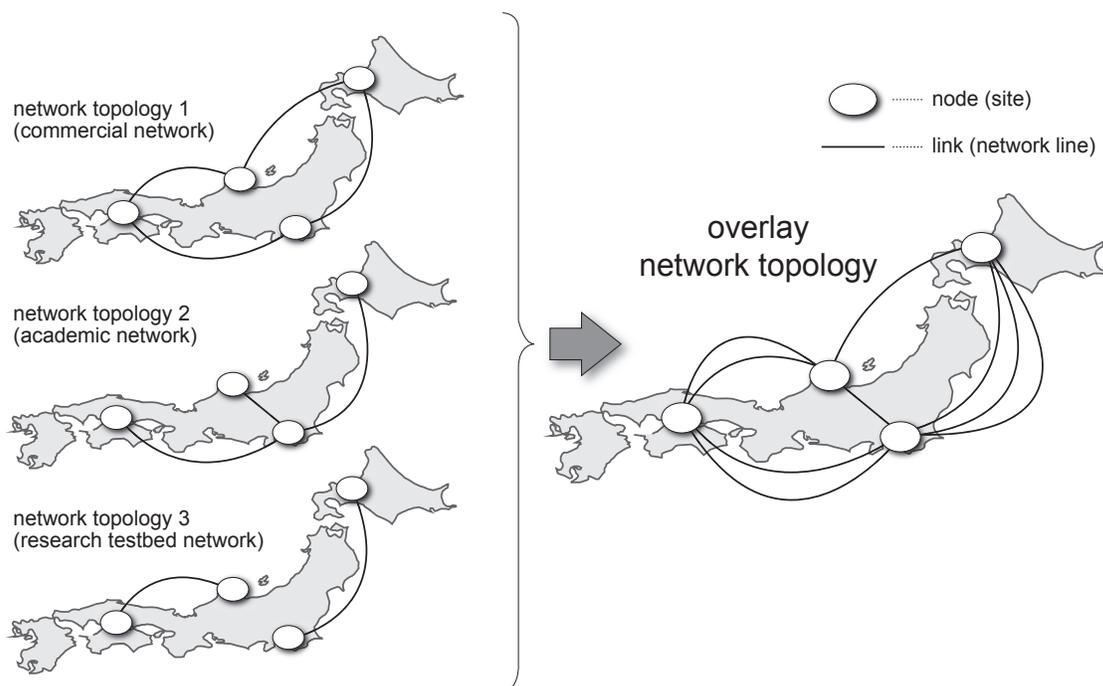


図 1 オーバーレイネットワークのトポロジ
Fig. 1 Overlay Network Topology.

3. 経路組み合わせの評価計算

3.1 ネットワーク情報の収集

各拠点のゲートウェイに設置された AR ルータは以下の 4 つのネットワーク情報を収集する。

- 隣接した拠点との間の片方向遅延時間 δ
- 隣接した拠点との間のパケット損失率 λ
- 隣接した拠点との間の利用可能帯域 β
- 自拠点から他の全ての拠点に向けて発生するトラフィック要求量 τ

n 個の拠点を N_1, \dots, N_n と表す時、拠点 N_i の AR ルータは隣接する拠点 N_j の AR ルータに対して計測パケットを送信し、拠点 N_i, N_j 間の片方向遅延時間 δ_{ij} の計測を行う。また計測パケットを用いた利用可能帯域 β_{ij} の推定を行う。映像伝送で求められる利用可能帯域変動の時間粒度を考慮し、利用可能帯域推定には pathChirp¹⁰⁾ や流体モデルを用いた測定手法¹¹⁾ を用いるものとする。これらの計測で用いられるパケットには連続したインデックス番号が付与されており、この番号を用いて単位時間あたりのパケット損失率 λ_{ij} を計測する。また拠点 N_i で発生した拠点 N_j へのトラフィック要求量を τ_{ij} とするとき、拠点 N_i の AR ルータは自拠点以外の全ての拠点に対するトラフィック要求量 $\tau_{i1}, \tau_{i2}, \dots, \tau_{in} (n \neq i)$ を計測する。

計測パケットは隣接拠点にのみ送られ、オーバーレ

イレーティングの下位レイヤーのルーティングに従い隣接拠点に転送される。一定時間ごとに計測パケットは送信され、収集されたネットワーク情報はクラウド上で動作する管理サービスに送られる (図 2)。

片方向遅延の計測には各拠点の時刻が同期している事が求められる。遅延時間を計測するため、 $100\mu s$ オーダーの精度での時刻同期が必要となるが、NTP の精度向上手法を用いて¹²⁾、輻輳時にも高精度の時刻同期を実現できる対処を施すものとする。またネットワーク情報を 10ms 毎に計測して 1sec 毎に管理サービスに送信した場合でも、ネットワーク情報の送信に要する帯域は 10kbps 程度であり、他のトラフィック要求への影響は無視することができるものとする。

3.2 管理サービス

クラウド上に配置された管理サービスは、ネットワーク情報の蓄積、トラフィック要求のスケジュール予約管理、及び経路組み合わせの評価計算を行う。管理サービスは各拠点の AR ルータから送られてくる片方向遅延時間 δ 、パケット損失率 λ 、利用可能帯域 β 及びトラフィック要求量 τ に対して各々の長さ w のバッファを用意し、新たに得られたネットワーク情報をバッファの先頭に格納する。新しい情報が書き込まれる際に、最も古い情報を破棄することで、常に最新の w 個のネットワーク情報をバッファに保存する。

予約されたトラフィック要求が発生する一定時間前になると、新たなトラフィック要求の発生によってパ

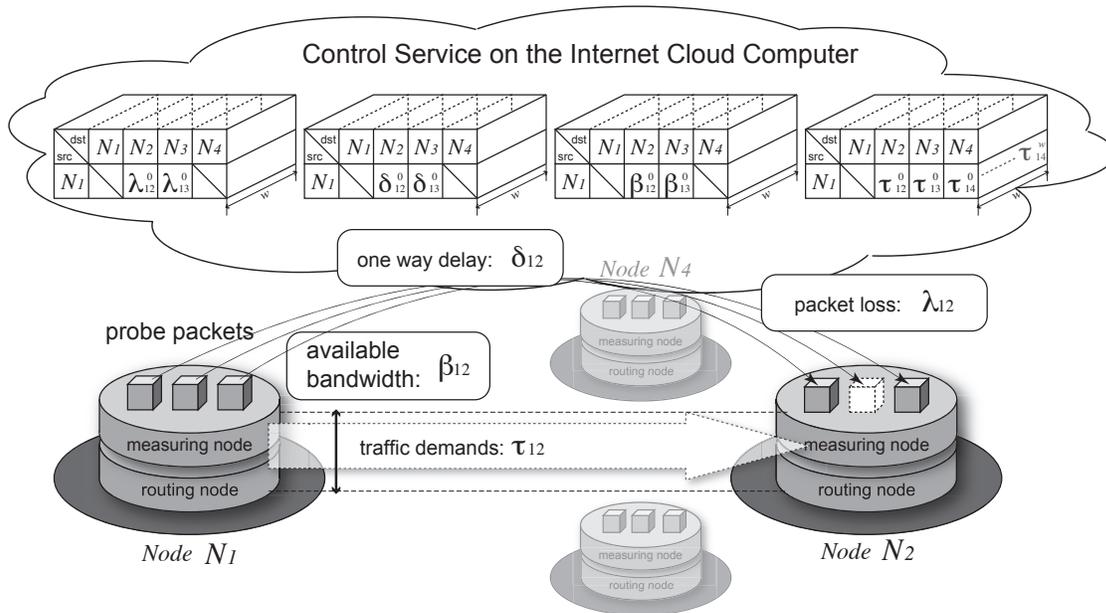


図2 ネットワーク情報の収集
Fig. 2 Measuring of Network Information.

ラメータが変化した場合での経路組み合わせの評価計算を行う。経路組み合わせの探索においては、環境の動的な変化に対する応答性を向上させるため、ある水準の準最適解を一度に求めるのではなく、漸進的な解空間の探索処理を行い、一定時間ごとに評価の良い解が発見され次第、ただちに経路の組み換えを行う。すなわち、管理サービス部は各拠点のARルータに対して、パケット損失を一定水準以上改善することが期待できる経路を定期的アナウンスする。また各拠点のARルータから収集したネットワーク情報を参照し、閾値を超えたパケット損失率の上昇を検知した場合においても、前述と同様な経路組み合わせの評価計算を行う。

本手法ではループのない経路制御を実現するため、送信元ノード (src) と目的地ノード (dst) の組み合わせに対してループのないすべての経路を探索の候補とし、往路と復路は同じ経路を辿るものとする。全ての src と dst のペアに対して1つずつ経路を選択し、経路組み合わせを定めると、src と dst の各ペアのトラフィック要求量は既知であるため、その経路組み合わせに従ってオーバーレイルーティングを行った場合の総パケット損失量と総遅延時間を離散イベント型シミュレーションで求めることができる。

3.3 経路候補のスコアリング

全ての src と dst 間の経路にそれぞれ総遅延時間に基づくスコアを付与し、スコアの小さい経路を優先的に選択して全体の経路組み合わせを構築する。各経路の総遅延時間は計測された片方向遅延時間を用いて算

出する。src: N_s , dst: N_d の全ての経路において最小の総遅延時間を M_{sd} とする時、src: N_s , dst: N_d の各経路の総遅延時間を M_{sd} で除した値をその経路のスコアとする。

図3に示す4ノード(4拠点)のリング状トポロジを例とすると、2ノードの組み合わせ $[N_1, N_2]$ において N_1 から N_2 に至るループのない経路は $\langle N_1, N_2 \rangle$ と $\langle N_1, N_3, N_4, N_2 \rangle$ の2つである。経路 $\langle N_1, N_2 \rangle$ の総遅延時間は2 msec、経路 $\langle N_1, N_3, N_4, N_2 \rangle$ の総遅延時間は18 msecなので、経路 $\langle N_1, N_2 \rangle$ のスコアは1.0、経路 $\langle N_1, N_3, N_4, N_2 \rangle$ のスコアは9.0となる。他の2ノードの組み合わせ、 $[N_1, N_3]$, $[N_1, N_4]$, $[N_2, N_3]$, $[N_2, N_4]$, $[N_3, N_4]$ についても同様にスコアを算出する。

スコアの小さい経路を優先的に用いて経路組み合わせを作る。作られた経路組み合わせの評価計算を行う。最初に作られる経路組み合わせは、スコア1.0の経路を組み合わせたもの、すなわち全ての2ノードの組み合わせにおける最短遅延時間の経路を組み合わせたものである。

次いでスコア1.5である経路 $\langle N_3, N_1, N_2, N_4 \rangle$ を含めた全ての経路組み合わせを総当たりで作成し、次いで経路 $\langle N_2, N_4, N_3 \rangle$ を含めた全ての経路組み合わせを総当たりで作成する。経路組み合わせを総当たりで作るときに、既に作られた組み合わせは作らず、重複を排除する。全ての経路候補をスコアの小さい順に加えて経路組み合わせを作り、スコアが同値の場合はよりホップ数の少ない経路を新たに含める。ホップ数も

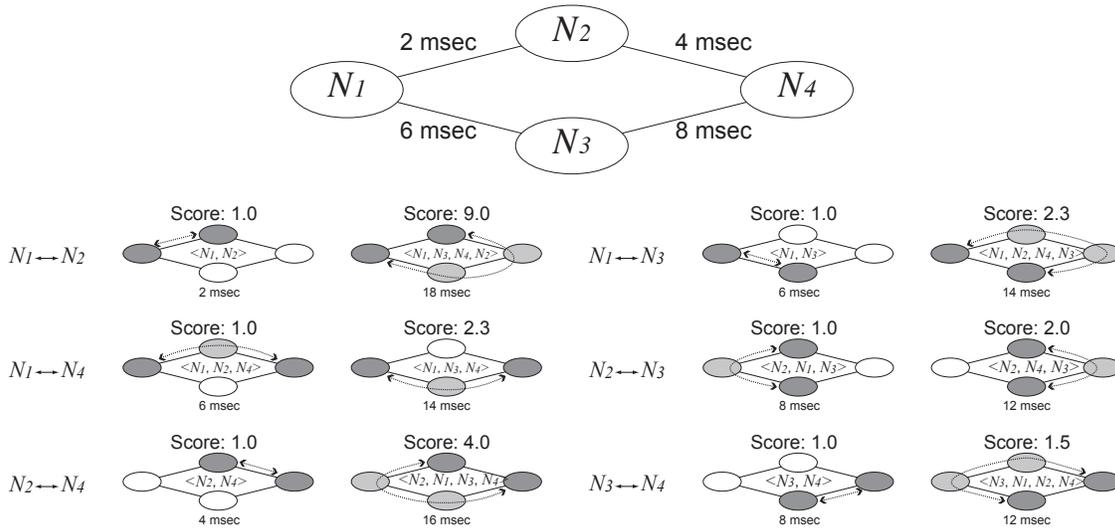


図3 総遅延時間に基づく経路候補のスコアリング
Fig. 3 Path Scoring Based on Total Latency.

同値の場合は同時に複数の経路を新たに含めて経路組み合わせを総当たりで作成する。また、計測されたトラフィック要求量が往路復路ともに0である2ノードの組み合わせに対してはスコアが1.0の最短遅延経路のみを経路候補とし、その他の経路を経路組み合わせに含めない。スコアの小さな経路を優先的に用いた経路組み合わせを作ることにより、総遅延時間の短い経路組み合わせから評価を行うことができ、評価実験において総パケット損失量が等しく、かつ総遅延時間がより短い経路組み合わせが後から発見される事を防ぐことができる。またスコアが同値の場合にホップ数が小さい経路を優先的に用いた経路組み合わせを作ることにより、トラフィックが重複する区間のより少ない経路組み合わせを作ることができ、クロストラフィックが発生する箇所の少ない経路組み合わせから評価することが期待できる。

3.4 シミュレーションによる評価計算

経路組み合わせが定まれば、各ノードに $src: N_s, dst: N_d$ のパケットが到着した時の送付先ノード N_n を示す経路制御表を作ることができる。この経路制御表に従う離散イベント型シミュレーションを行う。シミュレーション内時間で一定時間パケットを発生させ、発生したパケットが全て目的ノードに到着するまでをシミュレーションすることにより、総パケット損失量 Λ と総遅延時間 Δ を算出する。離散イベント型シミュレーションで用いられるノード間の遅延時間、帯域、トラフィック要求量のパラメータは、それぞれ計測された片方向遅延時間、可用帯域、トラフィック要求量により決定される。本研究ではパケットのキューイングおよびパケット損失のモデルとして ns-2 の設計を参考にして¹³⁾、全ての2ノードの組み合わせに対し

て一意に経路の定まる経路制御に特化した離散イベント型シミュレータを実装した。ある経路組み合わせに対するシミュレーションを終えた時、その結果がその時点での準最適解における総パケット損失量 Λ_{min} よりも小さな総パケット損失量となる時、この経路組み合わせを新たな準最適解として更新し、 Λ_{min} およびこの経路組み合わせにおける総遅延時間 Δ_{min} を更新する。総パケット損失量が Λ_{min} と同じ経路組み合わせが見つかった場合は、 Δ_{min} より小さな総遅延時間となる経路組み合わせだった場合にこの経路組み合わせを準最適解として更新する(図4)。ある経路組み合わせに対するシミュレーションの途中で、その時点の Λ_{min} よりも大きな総パケット損失量が算出された場合、その経路組み合わせのシミュレーションを途中で打ち切り、次の経路組み合わせのシミュレーションへと進む。ある経路組み合わせの評価計算の結果は、次の経路組み合わせの評価計算に対して、シミュレーションの途中打ち切りにおいてのみ影響を及ぼし、評価計算の結果には影響を及ぼさない。ある経路組み合わせの評価計算の結果を待つことなく、次の経路組み合わせの評価計算を行うことができるため、経路組み合わせの評価計算を並列化することができる。

4. 実験

4.1 精度評価

帯域幅は全て100 Mbpsで一定とし、各ノードを結びリンクの片方向遅延時間は片方向遅延時間の平均値が4 simulation steps(ss)となるような整数値を一様分布により与えた。各ノード間のトラフィック要求は、双方向でトラフィック要求が発生するか、片方向でト

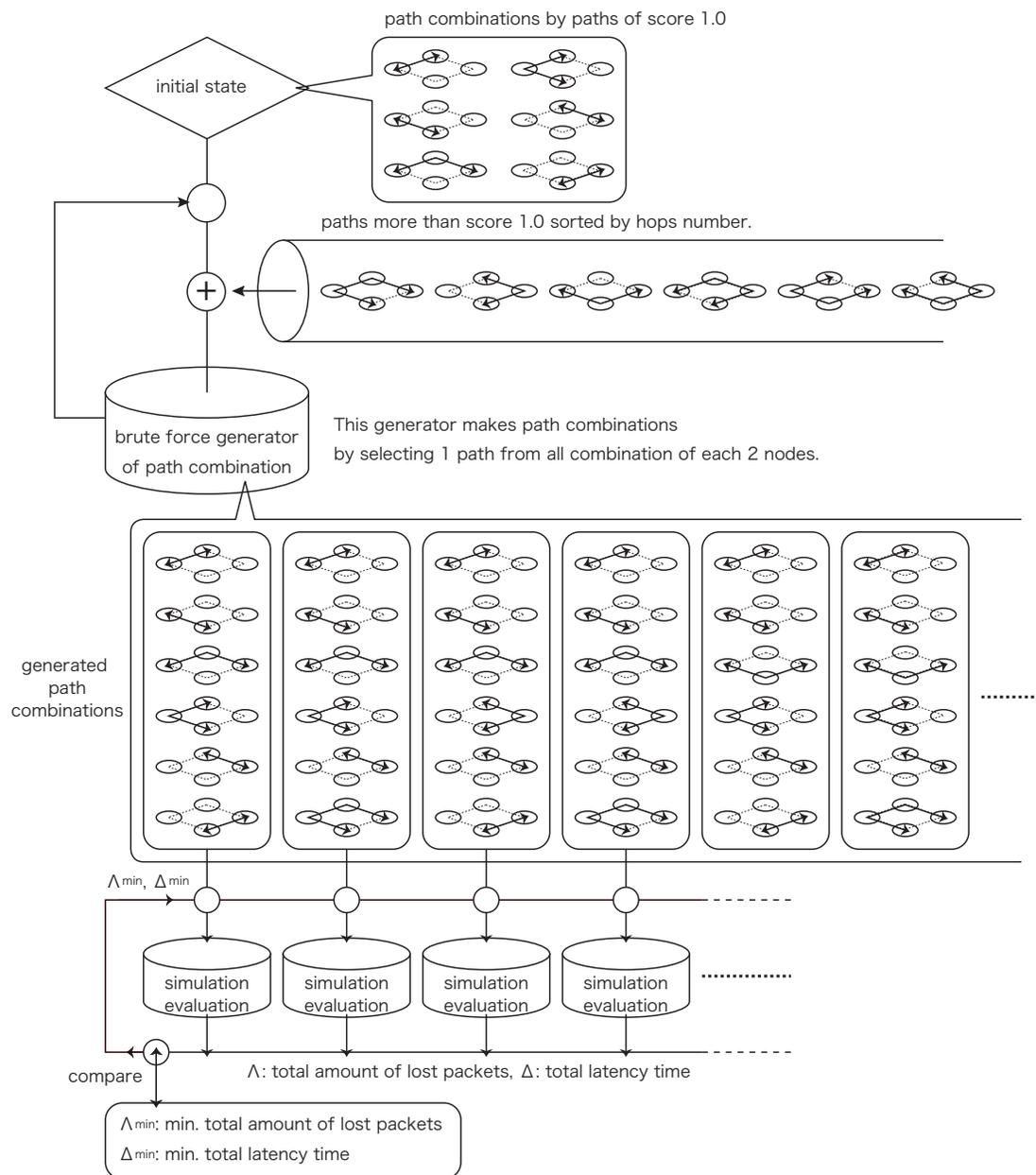


図 4 総当たりによる経路組み合わせの作成とその評価計算

Fig. 4 The Flow of Making Path Combinations by Brute Force and Evaluating Calculation

ラフィック要求が発生するか、トラフィック要求が相互に発生していないかのいずれかの状態を均等に取らせる。トラフィック要求量は固定ビットレートで 2^n Mbps として、 n は $0 \leq n \leq 4$ の範囲で一様分布で定め、トラフィック要求量のパターンを 200 個用意する。シミュレーションの開始から 100 ss までパケットを発生させ、全てのパケットが dst に到着するまで計算を行い、総パケット損失量と総遅延時間を算出する。

求められた最適解における経路組み合わせに従って経路制御が行われるように離散イベント型シミュレータである ns-2 を設定し、全てのトラフィック要求量のパターンに対する総パケット損失量と総遅延時間を算出した。提案手法で実装されている離散イベント型シミュレータと ns-2 の結果を比較し、シミュレータの精度を評価する。実装された離散イベント型シミュレータの精度を評価するために、ノード数 8 のネッ

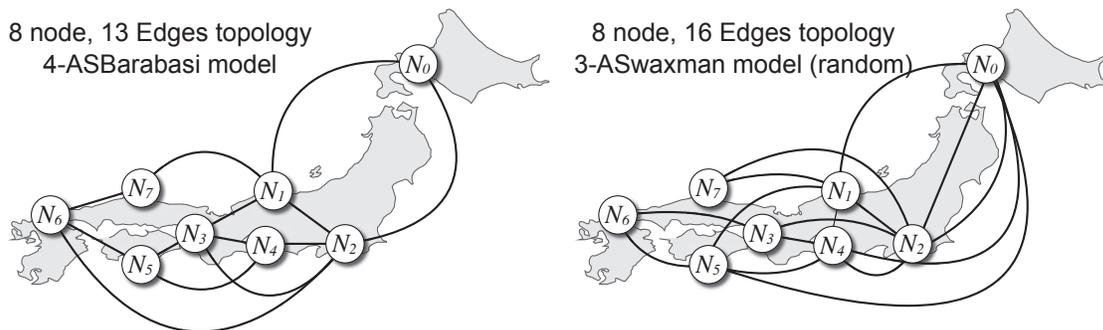


図 5 予備評価実験のためのネットワークのグラフ構造
Fig. 5 Illustration of the graph structure for preliminary evaluation

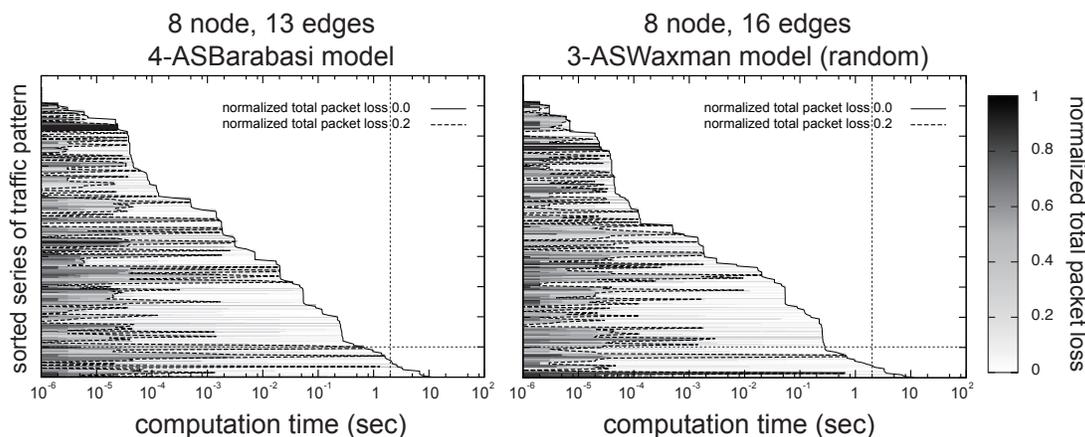


図 6 各ネットワークトポロジにおける最適解への収束に要する時間
Fig. 6 Required Times to converge on optimal solution in each network topology.

	4-ASBarabasi	3-ASWaxman (random)
packet loss	99.8% ($\sigma = 2.13 \times 10^{-2}\%$)	99.6% ($\sigma = 2.02 \times 10^{-2}\%$)
latency time	98.6% ($\sigma = 5.88 \times 10^{-3}\%$)	98.4% ($\sigma = 7.17 \times 10^{-3}\%$)

表 1 各ネットワークトポロジにおいて総パケット損失量と総遅延時間を提案手法と ns-2 で比較した結果 .

Table 1 Comparison to total packet loss and total delay time on proposed simulator and ns-2 in each network topology.

トワークトポロジを BRITE¹⁴⁾ を用いて生成した . ネットワークを図 5 に示す . グラフの生成モデルは Barabási-Albert と Waxman を用い , Waxman では Random ノード配置方法を用いた .

表 1 に結果を示す . 提案手法では膨大な量のシミュレーションを高速に実行するため , 経路組み合わせ評価に用いる離散イベント型シミュレータは送信元ノ

ドと目的地ノードを同じくするパケットが全て一意に定まる経路を辿ることを前提とした計算に特化させている . 実験結果は提案手法で実装したシミュレータが十分な精度で総パケット損失量と総遅延時間を算出することができ , これらの評価値が信頼できることを示している .

4.2 計算速度評価

実装された離散イベント型シミュレータの計算速度を評価するため , 4.1 節の評価実験で用いられた 3 種類のトポロジとネットワーク情報を用いた評価実験を行う . 200 個のトラフィック要求量のパターンに対して全ての経路組み合わせの評価を行い最適解を求めた . 計算時間の進捗と , 発見された準最適解の変化を図 6 に示す . 横軸はシミュレーションの進捗時間を対数で表し , 縦軸は 200 個のトラフィック要求量を並べたものである . 縦軸は最適解に到達するのに要した時間の順でソートしている . 各トラフィック要求量のパターンに対して , 計算時間の進捗とともに発見される準最適解はより小さな総パケット損失量となる . 発見

された準最適解における総パケット損失量の変化は、シミュレーション開始時の経路組み合わせにおける総パケット損失量と、最適解における総パケット損失量で正規化され、色の変化で示されている。経路組み合わせのシミュレーションは Intel Xeon 2.93 GHz (12 コア) を 2 基、メインメモリを 16 GB 搭載した計算機 10 台で行った。

正規化された総パケット損失率が 0.0 となる箇所、すなわち最適解に至った箇所を実線で示し、正規化された総パケット損失率が 0.2 となる箇所を点線で示す。全てのネットワークポロジにおいて 11 sec 以内に最適解を探索することに成功しており、最適解の探索に 1 sec 以上要しているのはトラフィック要求の全パターンのうち 10 % 以下である。また、全てのネットワークポロジにおいて 2 sec 以内には正規化された総パケット損失率 0.2 以下の解を探索することができている。これらの結果から、ノード数が 8 のネットワークにおいて様々なトラフィック要求のパターンに対して、1 sec ~ 10 sec 以内のオーダーで障害復旧を必要とするアプリケーションに対し、運用に現実的な時間でよりパケット損失の少ない経路を発見できることが示された。

5. ま と め

各拠点が片方向遅延、トラフィック損失率、トラフィック要求量を計測し、これを集約してトラフィックの適切な経路制御に関する準最適解を探索することで、トラフィック要求の動的変化や経由する経路の品質変化に対して適応するオンライン方式のトラフィックエンジニアリング手法を提案した。各拠点に設置された AR ルータは独立して自律的にネットワーク情報を計測、取得し、管理サービスに情報を集約して障害を検知する。スケジュールされたトラフィック要求の発生や障害の発見をトリガーとして経路組み合わせの再計算を行い、管理サービスはすみやかに迂回経路を広告する。評価実験により、本提案手法は 8 ノードのネットワークにおいて十分な精度で経路組み合わせを高速に評価することができ最適解を現実的な時間で得ることができることを示した。拠点数の増大に伴い計算量は非線形に増大するため、階層化による対処が今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) Awduche, D., Chiu, A., Elwalid, A., Widjaja, I. and Xiao, X.: Overview and Principles of Internet Traffic Engineering, RFC 3272 (2002).
- 2) 小原泰弘, 今泉英明, 加藤朗, 中村修, 村井純: 広範なトラフィック要求に対応する負荷分散経路計算アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.4, pp.1627-1640 (2007).
- 3) 熊木健二, 中川郁夫, 永見健一, 長谷川輝之, 阿野

茂浩: キャリアネットワークにおける MPLS TE LSP 確立に関するロードバランス手法の提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.4, pp.1616-1626 (2007).

- 4) Tao Ye, Hema Tahilramani Kaur, Shivkumar Kalyanaraman, Murat Yuksel: Large-Scale Network Parameter Configuration Using An On-line Simulation Framework, IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume 16, No. 4, pp.777-790 (2008)
- 5) Hitomi Tamura, Tsuyoshi Okubo, Yousuke Inoue, Kenji Kawahara, Yuji Oie: Implementation and Experimental Evaluation of On-Line Simulation Server for OSPF-TE, Proc of 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2007), pp.259-264 (2007)
- 6) Eric J. Anderson and Thomas E. Anderson: On the Stability of Adaptive Routing in the Presence of Congestion Control, INFOCOM '03 (2003).
- 7) Srikanth Kandula, Dina Katabi, Shantanu Sinha, Arthur Berger: Dynamic Load Balancing Without Packet Reordering, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol.38, No.2, pp.53-62 (2007)
- 8) 近堂 徹, 西村浩二, 相原玲二, 前田香織, 大塚玉記: 高品質動画画像伝送における FEC の性能評価, 情報処理学会論文誌 Vol.45, No.1, pp.84-92 (2004).
- 9) 菊池 豊, 藤井 資子, 山本 正晃, 永見 健一, 中川 郁夫: 遅延計測による日本のインターネットポロジの推定, 情報処理学会研究報告, 2007(72), 103-108 (2007).
- 10) Vinay Ribeiro, Rudolf Riedi, Richard Baraniuk, Jiri Navratil, Les Cottrell: "pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths", Proc. of P Passive and Active Measurement Workshop 2003.
- 11) 浜崇之, 藤田範人, 地引昌弘: "トラフィック短期変動の影響を考慮した利用可能帯域測定方式", 信学技法 CQ2007-26, pp.67-72 (2007).
- 12) 岩間 司, 金子明弘, 町澤朗彦, 鳥山裕史: 高速ネットワークを利用した高精度時刻比較, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J89-D, No.12, pp.2553-2563 (2006).
- 13) Teerawat Issariyakui, Ekram Hossain: Introduction to Network Simulator NS2, Springer, ISBN-13: 978-1441944122 (2009)
- 14) Medina, A., Lakhina, A., Matta, I., and Byers, J.: BRITE: An Approach to Universal Topology Generation, International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems- MAS-COTS '01 (2001).