

災害発生直後における被災の影響とデータ伝送量を考慮したネットワーク制御手法の提案とその評価

高平 寛之^{1,a)} 畑 美純^{1,b)} ギリエルイス^{1,c)} 和泉 諭^{1,d)} 阿部 亨^{1,2,e)} 菅沼 拓夫^{1,2,f)}

受付日 2018年6月25日, 採録日 2018年12月4日

概要: 地震や洪水, 火災など大規模災害時には, 公共機関や企業において, ローカルのサーバで管理していたオリジナルデータだけでなくバックアップデータも同時に失われ, 大きな問題となる場合が多い. これを防ぐためには, 災害直後に近隣の安全なサーバへ重要データを伝送する緊急バックアップが効果的であるといわれている. そこで本論文では, 大規模災害時に重要データを保護する緊急バックアップの実現を目的として, リンクに対する災害の影響と伝送が必要なデータ量を考慮したネットワーク制御手法を提案する. 本手法は, 災害速報などから決定したリンクの制限時間から通信経路の評価を行い, 制限時間内に伝送が必要な残りのデータ量が多い拠点から優先的に帯域の大きい経路を割り当てることで, 大規模災害時に効率の良い緊急バックアップを実現する. さらに, 緊急バックアップを想定したシミュレーションにより, 様々な災害やネットワークトポロジにおける提案手法の有効性の検証を行う.

キーワード: 耐災害性ネットワーク, 緊急バックアップ

A Proposal and Evaluation of Network Control Method Considering Disaster Risk and Data Amount Immediately after Disaster

HIROYUKI TAKAHIRA^{1,a)} MISUMI HATA^{1,b)} GUILLEN LUIS^{1,c)} SATORU IZUMI^{1,d)} TORU ABE^{1,2,e)}
TAKUO SUGANUMA^{1,2,f)}

Received: June 25, 2018, Accepted: December 4, 2018

Abstract: In large-scale disasters such as earthquakes, floods, and fires, organizations and companies may lose not only the original data managed by the local server but also the backup data. An effective emergency backup method which transfers backup data to neighboring safety servers during disasters is required. However, due to damaged paths in the network and the amount of data, there are cases when transmissions cannot be completed within the limited time. To solve this problem, we propose a network control method that considers disaster risk and data amount of each server. This method evaluates the communication path from the time limit of each link and assigns the path with large bandwidth from the server with large amount of data. We also verify the effectiveness of our proposed method through the simulation experiments.

Keywords: disaster resilient network, emergency backup

¹ 東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University,
Sendai, Miyagi 980–8577, Japan

² 東北大学サイバーサイエンスセンター
Cyberscience Center, Tohoku University, Sendai, Miyagi
980–8577, Japan

a) takahira@ci.cc.tohoku.ac.jp

b) m-hata@ci.cc.tohoku.ac.jp

c) lguillen@ci.cc.tohoku.ac.jp

d) izumi@ci.cc.tohoku.ac.jp

e) beto@tohoku.ac.jp

f) suganuma@tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 多くの公共機関や企業では, ローカルにあるサーバに保存された重要なデータを保護するために, 同一拠点内の複製サーバに対して定期的にバックアップすることが一般的となっている [1], [2]. しかし, 地震や洪水, 火災など大規模災害時にはローカルのサーバが破損し, オリジナルデータだけでなくバックアップデータも同時に失われることが考えられる. 実際に 2011 年に発生した東日本大震

災では、施設の倒壊によりサーバと複製サーバが同時に破損する事例が多く発生した。その結果、重要なデータが複製とともに完全に失われ、行政機能や救護活動に多大な影響を与えたことが問題として指摘されている [3], [4], [5]。

この問題に対し、近隣拠点間で複製を共有するストレージシステム (Risk-aware Data Replication: RDR) が有効視されている [6]。このストレージシステムでは、事前に拠点ごとの被災の影響を調査し、同時に被災しにくい地理的に離れた拠点間で複製を共有することで、大規模な災害においてもデータを保護することが可能になる。しかし、複製の共有はネットワークの資源を大きく圧迫するため、ネットワークの資源に余裕がある業務時間外で定期的を実施する。そのため、偶発的に発生する災害に対して、日々生成される最新のデータを保護することが困難であるという課題がある。

そこで、近年では災害発生直後に複製を伝送する緊急バックアップの研究がされている [7], [8], [9], [10]。緊急バックアップでは、定期的な複製に加え地震速報や津波被害推定システムなどの災害速報 [11], [12], [13] の受信直後に複製を伝送することで、災害発生直後の最新のデータを保護することが可能になる。一方で、緊急バックアップは通常のバックアップと比べ、災害速報の受信から施設が破損するまでの短い時間で大量のデータの伝送が必要になる。一般に、災害速報の受信から被災するまでの時間 (以下、「制限時間」と称する) は、地震は大きな揺れが到着し被災するまでに数十秒 [11]、津波は 5 分～30 分 [12]、ハリケーンは数時間～数日 [13] といわれており、この制限時間内に、被災が予測される数百の医療施設 [14] が、1 日あたりに新たに生成される 1 GB～135 GB [15] のデータをバックアップのためにいっせいに伝送しなくてはならない。そのため、データを効率良く伝送することが求められている。

緊急バックアップにおいて、効率良くデータを伝送するために考慮すべき要件として、通信経路の破損と各拠点のデータ量があげられる。通信経路の破損を考慮していない場合、通信経路のスイッチやケーブルなどの通信機器が被害し、通信経路の破損が多発する。これにより、伝送の途絶が発生しスループットが大幅に低下してしまう。また、各拠点のデータ量の違いを考慮していない場合、データ量の多い拠点の伝送時間が長くなり制限時間内に伝送が完了しない場合がある。

本研究では、被災の影響とデータ量を考慮したネットワーク制御手法を提案し、緊急バックアップにおける効率の良いデータ伝送を実現する。具体的には、災害速報などから取得したリンクの制限時間から通信経路の評価を行い、制限時間に対する残りのデータ量が多い拠点から優先的に帯域の大きい経路を割り当てることで、大規模災害時における効率の良い緊急バックアップを実現する。さらに、緊急バックアップを想定したシミュレーションにより、様々

な災害やネットワークトポロジにおける提案手法の有効性の確認と提案手法の性能評価を行った。実験結果から提案手法により、総伝送量を最大で 15.3%向上できることを確認した。以上から、提案手法により災害直後においても、災害の影響と各拠点のデータ量を考慮して経路制御を行うことで効率的なバックアップ伝送を実現できることを示した。

本論文の構成を以下に示す。2 章では緊急バックアップに関する関連研究を紹介し、その課題をまとめる。3 章では被災の影響とデータ量を考慮したネットワーク制御手法を提案し、その概要を述べる。4 章では提案するネットワーク制御手法の設計として、そのアルゴリズムを説明する。5 章では、災害時を想定したシミュレーション実験により、提案手法の有効性を検証する。6 章ではまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

2.1 通信経路の破損を考慮したネットワーク制御手法

緊急バックアップに関する既存手法として、通信経路の破損を考慮したネットワーク制御手法 [7] があげられる。ここで通信経路の破損とは LAN ケーブルが切断されたなどでスイッチ間のリンクが途絶して、完全に通信が不可能になった状態を意味する。この手法は、災害速報などから求めた破損しにくい経路を利用することで、通信経路の破損による伝送の途絶を防止している。しかし課題として、各拠点のデータ量が未考慮のため、データ量の多い拠点の伝送時間がデータ量の少ない拠点よりも長くなり、制限時間内に伝送が完了しないことがある。たとえば図 1 のネットワークにおいて、拠点 A と拠点 B がそれぞれ拠点 D と拠点 C にデータを伝送する状況で、拠点 A と拠点 B の制限時間が短く、拠点 A のデータ量が拠点 B よりも多い場合を考える。このような状況においてこの手法では、経路が破損しにくい経路 p_1 , p_2 を利用することで途絶を伝送の防止することができる。しかし、データ量の多い拠点 A に小さい帯域の経路が割り当てられることで伝送時間が長くなり、制限時間を超過してしまう可能性がある。

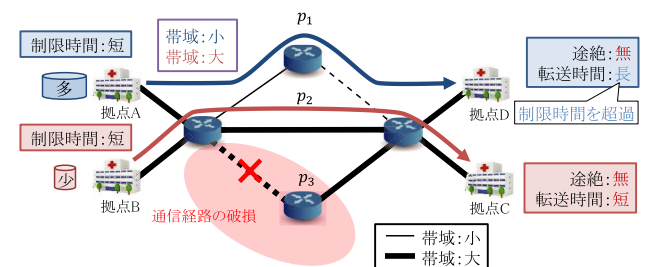


図 1 通信経路の破損を考慮した既存手法の課題

Fig. 1 Problem with existing method considering disaster risk.

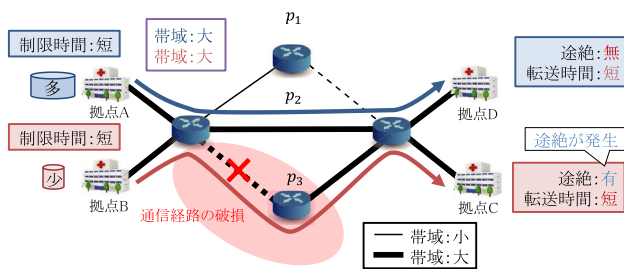


図 2 拠点のデータ量を考慮した既存手法の課題

Fig. 2 Problem with existing method considering data amount.

2.2 各拠点のデータ量を考慮したネットワーク制御手法

緊急バックアップに関する他のアプローチとして、拠点のデータ量を考慮したネットワーク制御手法 [8], [9], [10] があげられる。これらの手法は、各拠点のデータ量に応じた帯域を確保できる経路を拠点に割り当てることで、データ量の多い拠点の伝送時間を短縮している。しかし課題として、通信経路の破損が未考慮なため、通信経路の破損による伝送の途絶が多発することでスループットが大幅に低下する場合がある。たとえば図 2 において、これらの手法では、拠点 A と拠点 B のどちらの拠点も制限時間内にデータを伝送できるだけの帯域を持つ経路を割り当てることができる。しかし、通信経路が破損しやすい経路 p_3 が割り当てられ、伝送の途絶が発生してしまう可能性がある。

3. 被災の影響とデータ伝送量を考慮したネットワーク制御手法の提案

3.1 概要

前章で提示した課題を解決するために、被災の影響とデータ量を考慮したネットワーク制御手法を提案する。本提案手法の概要を図 3 に示す。本提案手法は、データ量の多い拠点 A に破損しにくく大きい帯域を持つ経路 p_2 を割り当て、データ量の少ない拠点 B に破損しにくく小さい帯域を持つ経路 p_1 を割り当てる。これにより、拠点 A と拠点 B どちらも途絶が発生せず、制限時間内にデータを伝送することが可能になる。

本提案手法は上記のような通信経路の割当てを、緊急地震速報や津波被害推定システムなどの災害速報サービスから得られる拠点や通信経路が破損するまでの制限時間と、各拠点が伝送する複製のデータ量に基づいた以下の 2 つの手順によりを実現する。

- 被災の影響に基づく経路評価
- データ量に基づく経路制御

被災の影響に基づく経路評価では、通信経路が破損するまでの制限時間から求めた経路の稼働率と帯域から経路を評価することで、破損しにくく大きい帯域の経路を選択する。データ量に基づく経路制御では、拠点の制限時間に対する残りのデータ量に応じた帯域を確保できる経路を割り

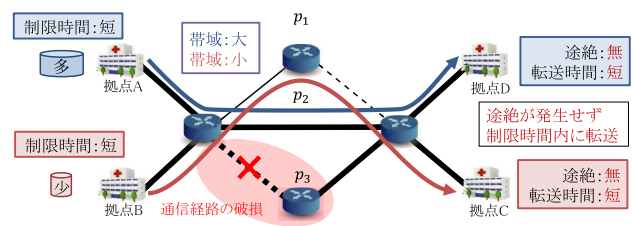


図 3 提案手法の概要

Fig. 3 Overview of proposed method.

当てることで、データ量の多い拠点の伝送時間を短縮する。以上 2 つの手順を一定の時間間隔で繰り返し実行することにより、緊急バックアップにおける効率の良いデータ伝送を実現する。

ただし、ネットワークの状態や送信するデータ量、被災の状況によっては、多くのリンクが破損し、十分な帯域が確保できず、制限時間内にデータ転送を完了することができない場合も存在する。

以降で経路評価と経路制御について説明する。

3.2 被災の影響に基づく経路評価

通信経路の破損によって伝送の途絶が発生した場合、一定の時間間隔ごとに実施されるネットワーク制御によってスイッチの経路表が更新されるまで、データを伝送することができなくなる。そのため被災の影響に基づく経路評価では、リンクの制限時間から各経路が次の更新時刻までに、そのリンク中の帯域をどの程度利用できるかを示した割合である稼働率を計算し、稼働率と帯域から次の更新時刻まで利用可能な帯域の期待値を表す期待帯域を計算する。そして、この期待帯域が最も大きい経路が、次の更新時間までのスループットが最も大きい通信経路となる。これにより、破損しにくく帯域の大きい通信経路を求めることができる。

3.3 データ量に基づく経路制御

データ量に基づく経路制御では、拠点の制限時間に対する残りのデータ量に応じた帯域を確保できる経路を割り当てることで、データ量の多い拠点の伝送時間を短縮し、各拠点が制限時間内に伝送したデータ量の合計（以下、「総伝送量」と称する）を増加させることができる。

しかし、総伝送量を最大化するためには、最適な拠点の組と通信経路を求める整数計画問題となるため、NP 困難な問題に該当する。そのため本提案手法では、各拠点の制限時間と残りのデータ量から拠点の優先順位を決め、優先順に期待帯域が大きい経路を割り当てる貪欲法のアプローチをとる。貪欲法を用いることで、比較的短時間で近似解を得られるため、緊急バックアップ時に総伝送量を大きくする経路を短時間で求めることが可能となる。これにより、災害速報受信直後において迅速な通信経路の計算を実現する。

4. 設計

4.1 ネットワークモデル

本提案手法で対象とするネットワークをグラフ $G(V, E)$ で表す. ここで, V はネットワーク内のスイッチやルータ, 拠点内のサーバなどのネットワーク機器からなるノードの集合, E はネットワークにあるリンクの集合である. $v \in V$ の中で, 複製を伝送する拠点を $s_k \in S$ ($k = 1, 2, 3, \dots, K$), s_k から伝送される複製を受信する拠点を s'_k とし, s_k は伝送する残りのデータ量 D_{s_k} と, データの伝送が不可能になるまでの制限時間 T_{s_k} を持つとする. また, 2つのノード $v_i, v_j \in V$ ($i \neq j$) 間のリンクを $e_{i,j} \in E$ と表し, それぞれのリンクは帯域 $b_{e_{i,j}}$ と, 帯域が利用できなくなるまでの制限時間 $T_{e_{i,j}}$ を持つとする. このネットワークに対して, 提案手法のネットワーク制御は一定の更新間隔 T_{update} ごとに適用され, $D_{s_k}, T_{s_k}, b_{e_{i,j}}, T_{e_{i,j}}$ の値が更新される. $K = 2$ におけるネットワークモデルの例を図 4 に示す.

4.2 被災の影響に基づく経路評価の設計

被災の影響に基づく経路評価の設計について, 2つの Step に分けて詳細を述べる. 3.2 節で述べたように本提案手法の経路評価は, リンクの制限時間から求めた経路の稼働率と帯域から求めた期待帯域によって経路を評価することで, 破損しにくく大きい帯域の経路を選択する.

(Step1) リンクの稼働率の算出

はじめに各リンク $e_{i,j}$ に対して, n 回目の更新における稼働率 $A^n_{e_{i,j}}$ ($0 \leq A^n_{e_{i,j}} \leq 1$) を式 (1) により算出する.

$$A^n_{e_{i,j}} = \begin{cases} 1 & ((n+1)T_{update} \leq T_{e_{i,j}}) \\ \frac{(T_{e_{i,j}} - nT_{update})}{T_{update}} & (nT_{update} \leq T_{e_{i,j}} < (n+1)T_{update}) \\ 0 & (T_{e_{i,j}} < nT_{update}) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) の概要を図 5 に示す. この図は, 1つのリンク $e_{i,j}$ の帯域の時間変化を表しており, 時刻 $t \leq T_{e_{i,j}}$ ではリンクの帯域 $b_{e_{i,j}}$ をすべて利用可能であるが, 時刻 $t > T_{e_{i,j}}$ ではリンクの帯域が利用不能 ($b_{e_{i,j}} = 0$) になる状況を考える. このとき, 各更新間隔 $[nT_{update}, (n+1)T_{update}]$ における稼働率は, 以下ようになる.

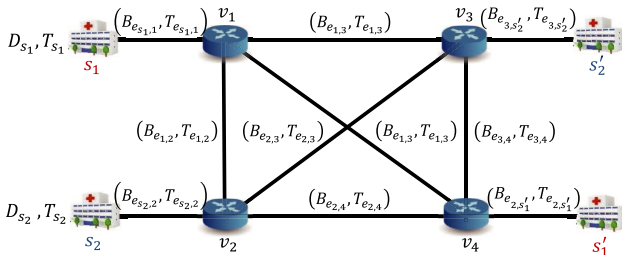


図 4 ネットワークモデルの例 ($K = 2$)

Fig. 4 Example of network model ($K = 2$).

- $t = [0, T_{update}]$
この区間では, リンクの帯域がすべて利用可能であるため, $A^0_{e_{i,j}} = 1$ となる.
- $t = [T_{update}, 2T_{update}]$
この区間では, 途中でリンクの制限時間 $t = T_{e_{i,j}}$ になるため, 途中でリンクが利用不能になる. そのため, このリンクは制限時間 $T_{e_{i,j}}$ から更新時刻 $t = T_{update}$ を引いた時間だけ帯域を利用できる. この時間を間隔 T_{update} で割った値が稼働率となるため, $A^1_{e_{i,j}} = (T_{e_{i,j}} - T_{update})/T_{update}$ となる.
- $t = [2T_{update}, 3T_{update}]$
この区間では, リンクの帯域が利用不能であるため, $A^2_{e_{i,j}} = 0$ となる.

(Step2) リンクの期待帯域の算出

次に (Step1) で求めたリンクの稼働率 $A^n_{e_{i,j}}$ と帯域 $b_{e_{i,j}}$ から, n 回目の更新から次の更新時刻までに利用可能な帯域の期待値を表す期待帯域 $W^n_{e_{i,j}}$ を式 (2) により算出する.

$$W^n_{e_{i,j}} = A^n_{e_{i,j}} \times b_{e_{i,j}} \quad (2)$$

以降に述べるデータ量に基づく経路制御では, $W^n_{e_{i,j}}$ を経路の評価として使用する.

4.3 データ量に基づく経路制御の設計

データ量に基づく経路制御の設計について, 5つの Step に分けて詳細を述べる. 3.3 節で述べたように本提案手法の経路制御は, 各拠点の優先順位を決め, 優先順に期待帯域が大きい経路を割り当てる貪欲法のアプローチで経路を導出する.

(Step1) 拠点の要求帯域の算出

各拠点 s_k ごとに, データ量 D_{s_k} を制限時間 T_{s_k} 内に伝送するために平均的に必要な帯域 B_{s_k} (以下, 要求帯域と称する) を式 (3) により算出する.

$$B_{s_k} = \frac{D_{s_k}}{T_{s_k}} \quad (3)$$

(Step2) 拠点の優先順位の決定

B_{s_k} が大きいほど制限時間に対する残りのデータ量が多

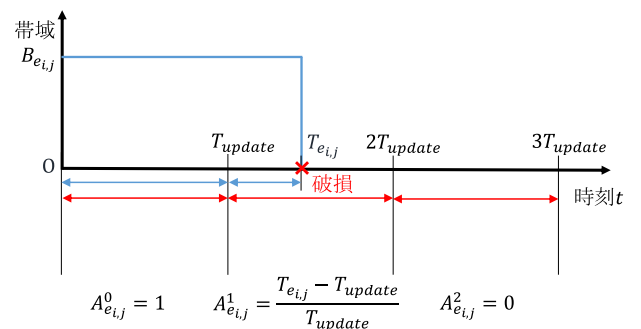


図 5 (Step1) リンクの稼働率の算出

Fig. 5 Calculation of link utilization rate (Step1).

い拠点であるため、大きい帯域の経路が必要となる。そのため、 B_{s_k} が大きい拠点順に、優先順位を決定する。

(Step3) 通信経路の導出

優先順位が最も高い拠点 s_k から s'_k までの通信経路 $p_k \in P_k$ の中で、 p_k のボトルネックとなっているリンクの期待帯域 $W_{e_{i,j}}^n$ が最も大きい通信経路 p_k^n を式 (4) により導出する。

$$p_k^n = \arg \max_{p_k \in P_k} \left(\min_{e_{i,j} \in p_k} W_{e_{i,j}}^n \right) \quad (4)$$

通信経路を導出するアルゴリズムはワーシャル–フロイド法 [16] を変形した動的計画法であり、

「3つのノード v_1, v_2, v_3 を選んで、 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$ の経路のボトルネックの帯域が $v_1 \rightarrow v_3$ の経路のボトルネックの帯域より大きければ $v_1 \rightarrow v_3$ のボトルネックの帯域を $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$ の帯域に更新」

という操作をすべてのノード v の組合せで繰り返すことで、ボトルネックの期待帯域 $W_{min}^{p_k^n}$ と経路 p_k^n を求めるといったアルゴリズムである。

(Step4) 通信経路の割当て

(Step3) で求めた s_k の通信経路 p_k^n を拠点 s_k に割り当てる。このとき、通信経路 p_k^n に含まれるリンクに対して、ボトルネックの帯域 $W_{min}^{p_k^n}$ をリンクの期待帯域 $W_{e_{i,j}}^n$ から除算し、新たにグラフ $G'(V, E)$ を作成する。

(Step5) すべての拠点に通信経路を割り当てる

(Step4) で求めたグラフ $G'(V, E)$ に対して、次に優先順位の高い拠点に対して (Step3) と (Step4) を繰り返し実行し、すべての拠点に通信経路が割り当てる。

以上の Step を更新間隔 T_{update} ごとに繰り返すことで、各拠点が制限時間内にデータを伝送できるように制御する。また、データ量に基づく経路制御の計算量は、(Step3) のアルゴリズムを複製を伝送する拠点の数 K 回繰り返すため、 $O(KV^3)$ となる。

5. 実験・評価

5.1 実験概要

本章では以下に示す 3つの実験を行った。

- 実験 1：緊急バックアップにおける性能評価
 - 緊急バックアップにおける提案の経路評価と経路制御の有効性を確認
- 実験 2：災害の特性に対する性能評価
 - 様々な災害の特性に対する提案手法の性能を検証
- 実験 3：ネットワークの複雑さに対する性能評価

– ネットワークの複雑さに対する提案手法の性能を検証
 これらの実験は、緊急バックアップを想定した計算機シミュレーションにより行った。シミュレーション環境を表 1 に示す。また、比較対象を表 2 に示す。手法 A は提案手法のうち被災の影響を考慮していないアプローチ、手法 B は提案手法のうちデータ量を考慮していないアプローチとした。具体的には手法 A は、本提案手法の経路評価における期待帯域 $W_{e_{i,j}}^n$ が、帯域 $b_{e_{i,j}}$ に稼働率 $A_{e_{i,j}}^n$ を掛けていない手法となる。また、手法 B は、経路制御における要求帯域 B_{s_k} が、制限時間 T_{s_k} にデータ量 D_{s_k} を掛けていない手法となる。

5.2 実験環境・手順

本実験で使用するネットワークポロジは以下の手順により生成した。

- (1) 30 km × 20 km の規模に 100 個の拠点をランダムに配置
- (2) 拠点間を Gabriel モデル [17] に従って接続 (広く普及している光ネットワークを想定し、帯域を 500 Mbps ~ 1000 Mbps に設定)
 - ここで Gabriel モデルとは距離が近い拠点間が接続される平面ネットワークのことである。
- (3) 互いに物理的に 10km 離れた拠点を複製し合う拠点のペアとして決定

以上の手順により生成されたネットワークポロジの例を図 6 に示す。複製し合う拠点のペアどうしは同じ色で表示されている。

緊急バックアップは偶発的に発生する様々な災害から最新のデータを保護するための手法であるため、本実験においても様々な災害に対する提案手法の性能を評価を行うことが理想である。しかし、多種多様な災害をすべてモデル化し、シミュレーションを実施することは困難である。そのため本研究では、多種多様な災害を災害の規模と災害の速度という 2つのパラメータに着目して、多種多様な災害のモデル化を行った。

本実験で用いた災害モデルを図 7 に示す。この災害モデルは、災害の規模 r を半径とした円の中心 P から災害の速度 v で被害が拡大するモデルである。このとき、災害の

表 1 シミュレーション環境

Table 1 Simulation environment.

OS	Windows 10 Pro 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60 GHz
実装言語	Java

表 2 実験における比較対象

Table 2 Comparison between proposed method and existing methods.

	手法 A	手法 B	提案手法
経路評価における期待帯域 $W_{e_{i,j}}^n$	帯域	帯域 × 稼働率	帯域 × 稼働率
経路制御における要求帯域 B_{s_k}	データ量 / 制限時間	1 / 制限時間	データ量 / 制限時間

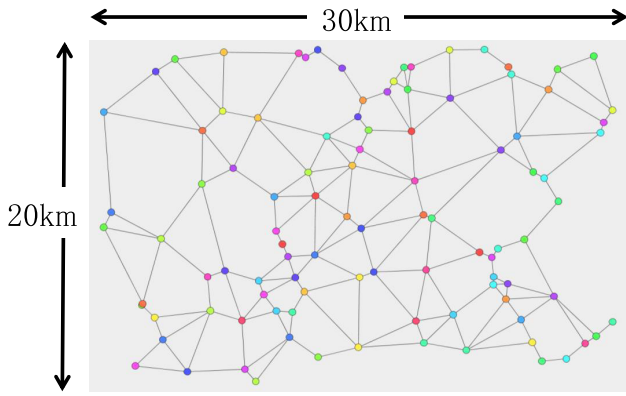


図 6 実験のネットワークトポロジ ($|V| = 100, |E| = 183$)
 Fig. 6 Network topology for experiment ($|V| = 100, |E| = 183$).

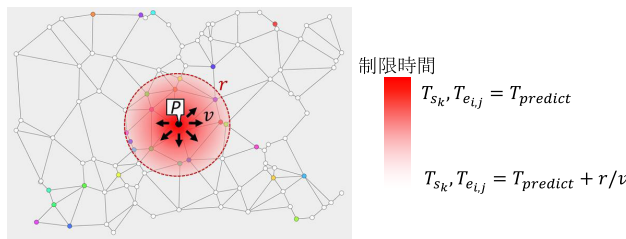


図 7 災害モデル
 Fig. 7 Disaster model.

規模 r の範囲内にある拠点を s_k , ペアとなる拠点を s'_k とする。また、災害の速度 v と P からの拠点とリンクの距離 $d_{s_k}, d_{e_{i,j}}$ に応じて拠点とリンクの制限時間 $T_{s_k}, T_{e_{i,j}}$ を式 (5) と式 (6) により決定する。

$$T_{s_k} = T_{predict} + d_{s_k}/v \quad (5)$$

$$T_{e_{i,j}} = T_{predict} + d_{e_{i,j}}/v \quad (6)$$

$T_{predict}$ は災害予報発信から被害が発生するまでの予測時間を表し、時刻 $t = T_{predict}$ から災害が拡大する状況を想定する。また、本実験におけるリンクの距離 $d_{e_{i,j}}$ は、リンクの midpoint から P までの距離とした。

以下にシミュレーション実験の手順を示す。

$t = 0$: 拠点 s_k はペアの拠点 s'_k に対してデータ量 D_{s_k} の伝送を開始

$t = T_{predict}$: 中心 P から被害の拡大が開始

$t = T_{predict} + r/v$: 各拠点の伝送量, 伝送の途絶回数を測定
 帯域と各拠点のデータ量を変更しながら以上の手順を 100 回繰り返し、総データ量に対する総伝送量の平均を算出した。また、各実験で共通するパラメータの値を表 3 に示す。総データ量 D_{total} は医療機関が保有しているバックアップが必要なデータ量とし、拠点のデータ量 D_{s_k} はその平均の半分とした。また、災害の中心 P は対象となるエリアの中心とし、更新間隔 T_{update} はネットワーク機器の平均の経路情報更新間隔、 $T_{predict}$ は災害予報が発生してから災害が起こるまでの平均時間域をそれぞれ想定し設定した。

表 3 各実験で共通するパラメータの値

Table 3 Common parameters in for all experiments.

パラメータ	値
総データ量 D_{total}	20 GB~500 GB
拠点のデータ量 D_{s_k}	$D_{s_k} > \frac{D_{total}}{K*2}$
災害の中心 P	(15 km, 10 km)
更新間隔 T_{update}	30 s
予測時間 $T_{predict}$	100 s

表 4 実験 1 におけるパラメータの値

Table 4 Parameters used in experiment 1.

パラメータ	値
災害の規模 r	5 km
災害の速度 v	50 m/s

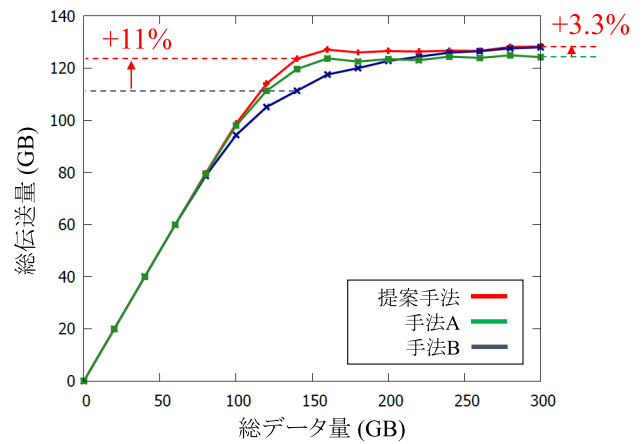


図 8 実験 1 の結果：総データ量に対する各手法の総伝送量
 Fig. 8 Result of experiment 1: amount of transferred data.

5.3 実験 1：緊急バックアップにおける性能評価概要

本実験では、表 4 に示した一定の災害の規模 r と災害の速度 v に対してシミュレーションを行い、総データ量に対する総伝送量を各手法と比較することで、緊急バックアップにおける提案の経路評価と経路制御の有効性を検証した。
 結果・考察

総データ量に対する平均の総伝送量の測定結果を図 8 に示す。この測定結果から以下のことを確認した。

(結果 1-1) 提案手法は手法 A に対して、平均の総伝送量を最大で 4GB (増加率 3.3%) 向上

この理由は、提案手法は被災の影響を考慮した経路評価により、伝送の途絶回数を削減できたためであると考えられる。本実験における総データ量に対する平均の通信の途絶回数を図 9 に示す。これより、提案手法は平均の途絶回数を 12.7 回に抑え、手法 A の平均の途絶回数 14.7 回に比べて途絶回数を削減できたことが分かる。これにより、通信経路の破損によるスループットの低下を防止し、総伝送量を向上できたと考える。このことから、通信経路が破損する状況における提案の経路評価の有効性を確認した。

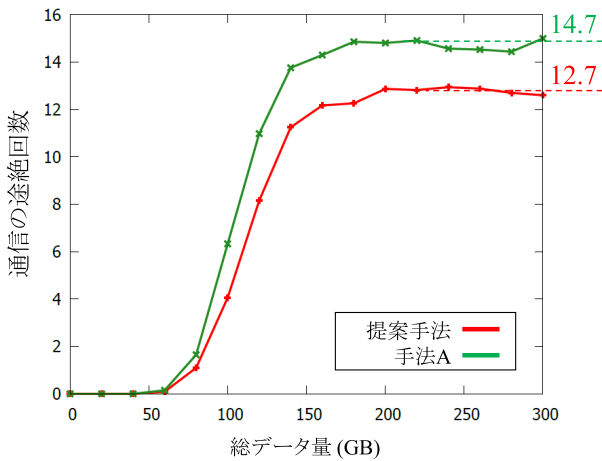


図 9 総データ量に対する通信の途絶回数
Fig. 9 Number of disconnected transmissions.

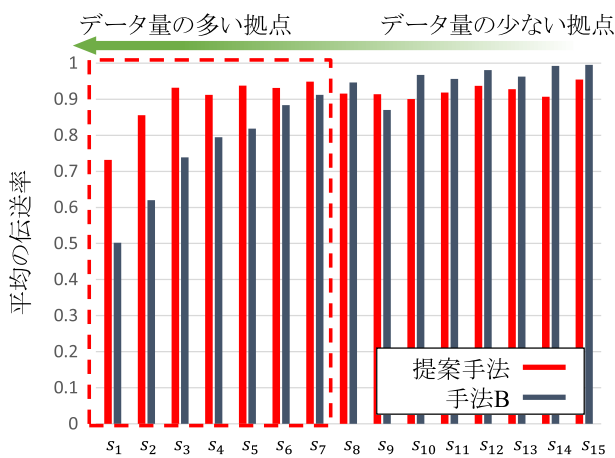


図 10 $D_{total} = 140$ GB における各拠点の平均の伝送率
Fig. 10 Average ratio of transferred data per server at $D_{total} = 140$ GB.

(結果 1-2) 提案手法は手法 B に対して、平均の総伝送量が最大で 12 GB (増加率 11%) 向上

この理由は、提案手法はデータ量を考慮した経路制御により、データ量の多い拠点の伝送時間を短縮できたためであると考えられる。本実験において、手法 A に対する提案手法の総伝送量の増加率が最も大きい $D_{total} = 140$ GB における各拠点の平均の伝送率 (伝送量/データ量) を図 10 に示す。左側からデータ量の多い拠点順に並べている。図から提案手法は手法 A に比べ、データ量の多い拠点の伝送率が大きく向上できたことが分かる (図 10 の赤点線)。したがって、各拠点のデータ量の違いによる伝送時間の増加を防ぎ、総伝送量を向上させることができた。以上より、各拠点のデータ量が異なる状況における提案の経路制御の有効性を確認した。

しかし実運用上では、50%以上が被災した場合でも 90%以上の可用性 [19] が 1 つの目安と判断されているため、今後はその数値目標を目指し、さらなる改善を検討する。

表 5 (実験 2-1) におけるパラメータの値

Table 5 Parameters used in experiment 2-1.

パラメータ	値
災害の規模 r	3 km, 4 km, 5 km
災害の速度 v	50 m/s

表 6 (実験 2-2) におけるパラメータの値

Table 6 Parameters used in experiment 2-2.

パラメータ	値
災害の規模 r	5 km
災害の速度 v	30 m/s, 300 m/s, 3000 m/s

表 7 災害の規模 r に対する提案手法の総伝送量の増加率

Table 7 Increase rate of transferred data per disaster of scale r .

	vs. 手法 A	vs. 手法 B
$r = 3$ km	+2.6%	+2.4%
$r = 4$ km	+3.0%	+8.6%
$r = 5$ km	+3.3%	+11.0%

5.4 実験 2 : 災害の特性に対する性能評価概要

本実験では、災害の規模 r と災害の速度 v を変化させてシミュレーションを行い、総データ量に対する総伝送量を各手法と比較することで、災害の特性に対する提案手法の性能を検証した。ここでは、火事のように災害の規模が状況によって変わる災害における提案手法の効果を検証した。さらに、津波やハリケーン、地震のように速度が異なる災害における提案手法の効果を検証した。以下の 2 つのパラメータの変化に対して、実験を行った。

(実験 2-1) 一定の災害の速度 v に対して、災害の規模 r を変化 (表 5)

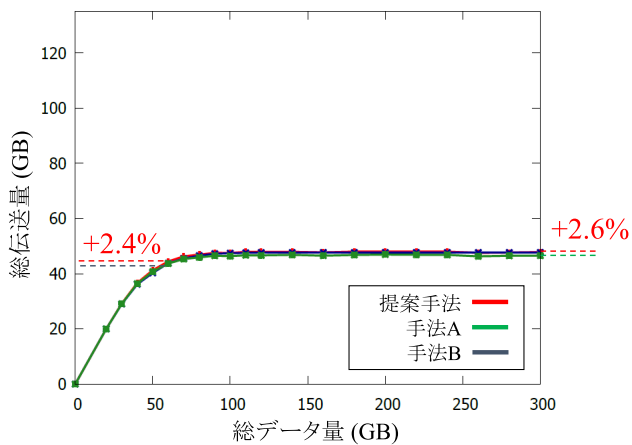
(実験 2-2) 一定の災害の規模 r に対して、災害の速度 v を変化 (表 6)

(実験 2-1) の結果・考察

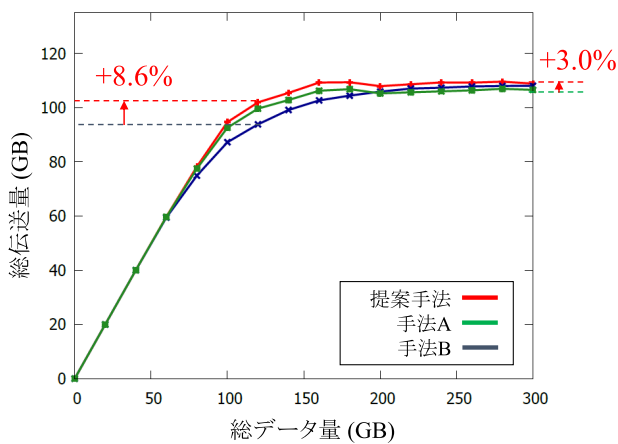
$r = 3$ km, 4 km, 5 km において、複製を送る拠点の数 K はそれぞれ 4, 11, 15 となった。このとき、総データ量に対する平均の総伝送量の測定結果を図 11 に示す。また、各手法に対する提案手法の総伝送量の増加率を表 7 に示す。この測定結果から確認できたことを以下に示す。

(結果 2-1-1) 提案手法は手法 A に対して、 r が大きいほど総伝送量の増加率が向上

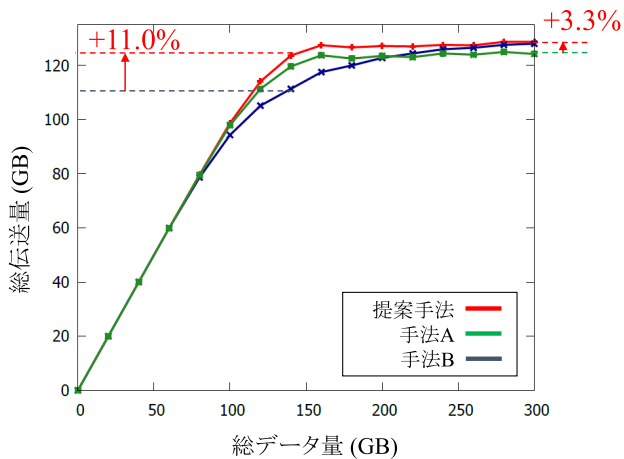
これは、 r が大きい場合、破損するリンクの数が増えるためであると考えられる。手法 A は通信経路の破損を考慮していないため、破損するリンクの数が増えるにつれ、伝送の途絶回数が増加してしまう。一方で提案手法は、破損するリンクの数が増えた場合においても、手法 A と比べ伝送の途絶回数を削減することができるため、総伝送量が向上した。



(a) $r = 3$ km



(b) $r = 4$ km



(c) $r = 5$ km

図 11 (実験 2-1) の結果：総データ量に対する各手法の総伝送量
Fig. 11 Result of experiment 2-1: amount of transferred data vs. total data size.

(結果 2-1-2) 提案手法は手法 B に対して、 r が大きいほど総伝送量の増加率が向上

この理由は、 r が大きい場合、データ量の異なる拠点の数が增多するためであると考えられる。手法 B は各拠点のデータ量を考慮していないため、データ量の異なる拠点の

表 8 災害の速度 v に対する提案手法の総伝送量の増加率

Table 8 Increase rate of transferred data per disaster at speed v .

	vs. 手法 A	vs. 手法 B
$v = 30$ m/s	+5.6%	+8.4%
$v = 300$ m/s	+0.5%	+13.7%
$v = 3,000$ m/s	+0.1%	+15.3%

数が増えるにつれ、制限時間内にデータの伝送を完了できない拠点が增多してしまう。一方で提案手法は、データ量の異なる拠点の数が增多した場合においても、制限時間内に残りのデータを伝送できるように制御するため、総伝送量が向上した。

以上より、提案手法は大規模な災害時の緊急バックアップにおける総伝送量を向上させることができた。

(実験 2-2) の結果・考察

$v = 30$ m/s, 300 m/s, 3000 m/s において、総データ量に対する平均の総伝送量の測定結果を図 12 に示す。また、各手法に対する提案手法の総伝送量の増加率を表 8 に示す。この測定結果から以下のことを確認した。

(結果 2-2-1) 提案手法は手法 A に対して、 v が小さいほど総伝送量の増加率が向上

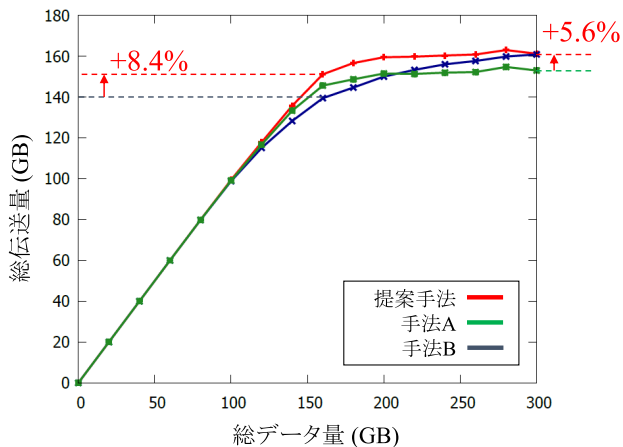
この理由は、 v が小さい場合、更新間隔ごとの途絶回数が増加するためであると考えられる。 v が小さい場合、災害による被害の拡大は緩やかに進むことになり、各リンクの制限時間は大きく異なる状況になりやすい。このような状況で手法 A は、通信経路の破損を考慮しないため、破損した通信経路から新しい通信経路へ切り替えた後に、新しい通信経路が再び破損する可能性が高くなる。一方で提案手法は、次の更新間隔までのリンクの制限時間を考慮した通信経路を選択するため、総伝送量が向上した。

またこの結果より、提案手法は手法 A と比べて、災害の速度が小さい津波やハリケーンに対して高い効果が得られると推測できる。

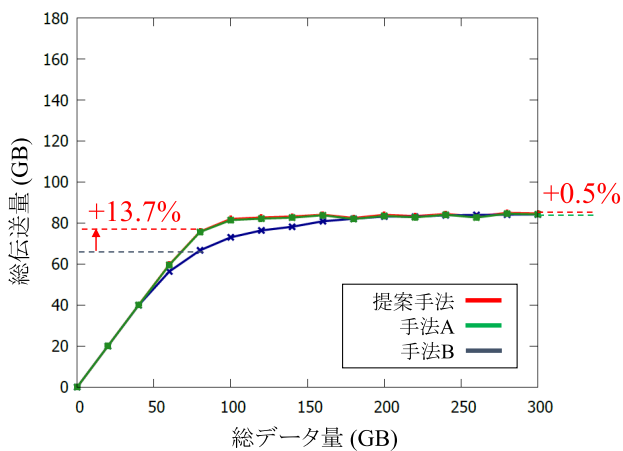
(結果 2-2-2) 提案手法は手法 B に対して、 v が大きいほど総伝送量の増加率が向上

この理由は、 v が大きい場合、平均帯域 B_{s_k} がデータ量に依存するためであると考えられる。 v が大きい場合、災害による被害の拡大は急速に進むことになり、各拠点の制限時間は等しい状況になりやすい。このような状況では制限時間の短い拠点よりも、残りのデータ量の多い拠点ほど大きな帯域を必要とする。しかし手法 B はデータ量を考慮しないため、データ量の多い拠点に小さい帯域が割り当てられ制限時間内にデータを伝送できない可能性が高くなる。一方で提案手法は、データ量と制限時間の比率が高い拠点に対して大きい帯域の経路を割り当てるため、総伝送量が向上した。

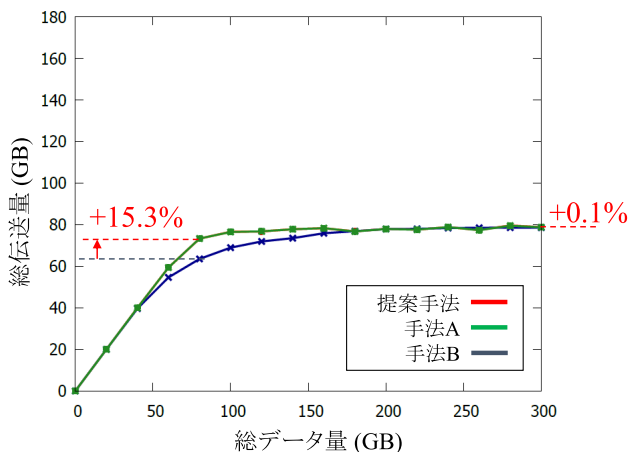
またこの結果より、提案手法は手法 B と比べて、災害



(a) $v = 30$ m/s



(b) $v = 300$ m/s



(c) $v = 3000$ m/s

図 12 実験 2 の結果 (E2-2) : 総データ量に対する各手法の総伝送量
Fig. 12 Result of experiment 2-2: amount of transferred data vs. total data size.

の速度が大きい地震に対して高い効果が得られると考えられる。

以上より、提案手法は様々な災害時の緊急バックアップにおける総伝送量を向上させることができた。

表 9 リンクの数 E に対する提案手法の総伝送量の増加率

Table 9 Increase rate of transferred data per number of links E .

	vs. 手法 A	vs. 手法 B
$E = 150$	+4.6%	+7.0%
$E = 250$	+5.5%	+3.5%
$E = 350$	+7.2%	+2.2%

5.5 実験 3 : ネットワークの複雑さに対する性能評価概要

本実験では、リンクの数 E を変化させた 3 つのネットワークに対して実験を行い、総データ量に対する総伝送量を各手法と比較することで、ネットワークの複雑さに対する提案手法の性能を検証した。実験で使用するネットワークは、リンクの数をパラメータにより変更可能な Waxman モデル [17] に従って生成し、リンクの数 E はそれぞれ 150, 250, 350 とした。

結果・考察

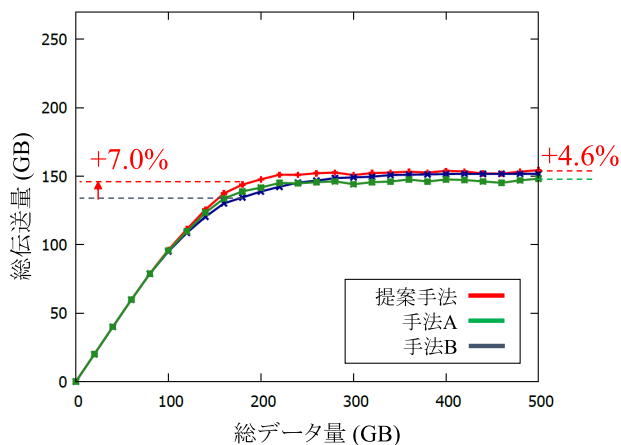
$E = 150, 250, 350$ のネットワークにおいて、総データ量に対する平均の総伝送量の測定結果を図 13 に示す。また、各手法に対する提案手法の総伝送量の増加率を表 9 に示す。この測定結果から確認できることを以下に示す。

(結果 3-1) 提案手法は手法 A に対して、 E が多いネットワークほど総伝送量の増加率が向上

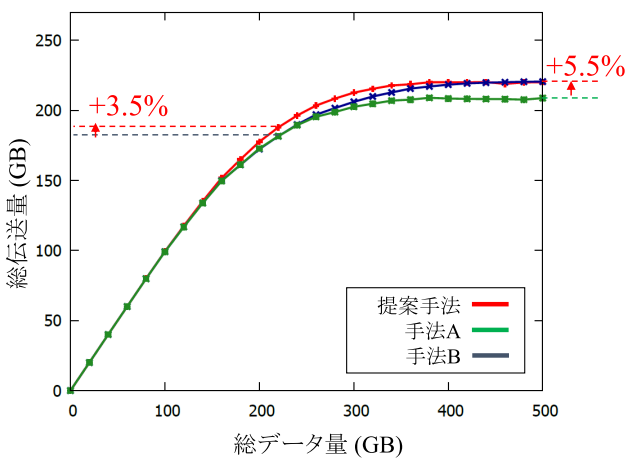
この理由は、 E が多いネットワークの場合、宛先の拠点までの破損しにくい経路が存在しやすくなるためと考えられる。 E が多いネットワークの場合、通信経路の冗長性が高くなり、伝送元の拠点から宛先の拠点までに利用可能な経路の本数が多くなる。そのため、宛先の拠点までの破損しにくい経路が存在しやすくなるため、破損しにくい経路を選択する提案の経路評価の効果が大きくなり、総伝送量が向上した。したがって、この結果より、提案手法は手法 A と比べて、よりネットワークが複雑な都市部のネットワークにおいて高い効果が得られると考える。

(結果 3-2) 提案手法は手法 B に対して、 E が少ないネットワークほど総伝送量の増加率が向上

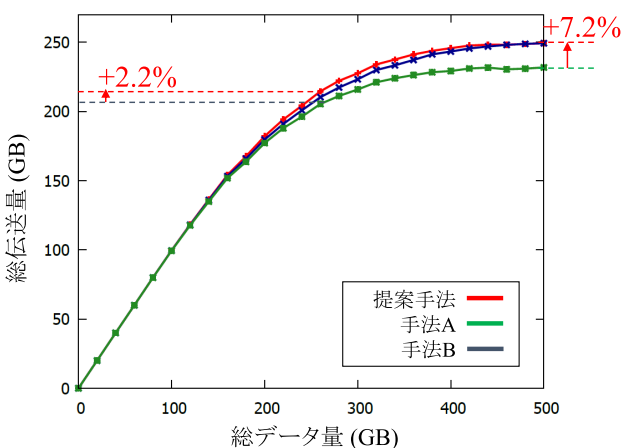
これは、 E が少ないネットワークの場合、データ量の多い拠点により優先的に通信経路を割り当てなければならないためと考えられる。 E が少ないネットワークの場合、伝送元の拠点から宛先の拠点までに利用可能な経路の本数が少ないため、優先順位の高い拠点に比べて、優先順位の低い拠点に割り当てられる経路の帯域が小さくなりやすい。手法 B は各拠点のデータ量を考慮していないため、データ量の少ない拠点に対して大きい帯域の経路を割り当てることがあり、データ量の多い拠点に割り当てられる経路の帯域が小さくなる可能性が高い。一方で提案の経路評価は、データ量の多い拠点に対して優先的に大きい帯域の経路を割り当てることができるため、総伝送量が向上した。また



(a) E = 150 のネットワークに対する実験結果



(b) E = 250 のネットワークに対する実験結果



(c) E = 350 のネットワークに対する実験結果

図 13 実験 3 の結果：総データ量に対する各手法の総伝送量

Fig. 13 Result of experiment 3: amount of transferred data vs. total data size.

この結果より、提案手法は手法 A と比べて、ネットワークが複雑ではない地方のネットワークにおいて高い効果が得られると考えられる。

以上より、提案手法は様々なネットワークに対しても緊急バックアップにおける総伝送量を向上させることができ

ると考える。

また、今回はいずれの実験でも 300 秒から 500 秒の時間で終了した。

5.6 実環境への適用

本提案手法を実環境に適用するために要件として、以下の 2 つがあげられる。

(要件 1) 災害速報受信直後における迅速な通信経路の変更

(要件 2) 各拠点が伝送する複製のデータ量の取得

これらの要件は、Software Defined Networking を実現する技術の 1 つである OpenFlow [18] を用いることで実現できると考える。OpenFlow は、ネットワーク内のスイッチの制御機能をコントローラと呼ばれる機器に一元化し、プログラマブルにネットワークを集中制御できる技術である。コントローラ上に提案手法を実装することで、提案手法の要件を満たす実装が可能になると考える。以下に各要件に対する実装について詳細を述べる。

(要件 1) 災害速報受信直後における迅速な通信経路の変更

初めに、コントローラが各種災害速報サービスの API を利用して災害の発生を検出する。次に、コントローラはあらかじめデータベースに保存してある拠点とリンクの位置と災害速報などから得られる被災予測地域を対応づけ、拠点とリンクの制限時間を決める。その後、コントローラは提案手法を実行することで各拠点の通信経路を導出し、スイッチの経路表へ通信経路を登録するといった手順をとることで、(要件 1) を満たすことができると考える。今回の実験のように 100 台のスイッチを管理する状況下においては 1 台の高性能コントローラによりネットワーク情報の検知から経路の登録まで数秒で実行可能であると考えられる。

(要件 2) 各拠点が伝送する複製のデータ量の取得

まず、すべての拠点はコントローラに対して拠点の位置とサーバの IP アドレスを事前に通知しておく。災害速報受信後、コントローラは被災予測地域内の拠点にデータ量の要求パケットを送信する。そして、要求パケットを受け取った拠点は複製のデータ量をコントローラに送信し、複製の伝送を開始するといった手順をとることで、(要件 2) を満たすことができると考える。

以上の実装により、提案手法を実環境に適用できると考えられる。

6. おわりに

本研究では、大規模災害時における最新のデータを保護する緊急バックアップの実現を目指し、被災の影響とデータ量を考慮したネットワーク制御手法を提案した。さらにシミュレーション実験を通して、本提案手法は様々な環境・災害においても効率の良いデータの伝送を実現できること

示した。

今後の課題として、現状では貪欲法のアプローチを用いて優先順位の高い拠点に対して帯域が最も大きい通信経路を割り当てているが、他の複数の拠点も含めて全体を考慮して帯域や経路を割り当てるようアルゴリズムを拡張し、より最適な経路を割り当てることができるアプローチを検討する。さらに、実環境において途絶の影響を受けた場合の提案手法の効果の検証を行う。

また、提案手法は集中制御によりネットワーク全体を管理できる条件下で成立する。集中制御において OpenFlow コントローラやその制御ラインが被災の影響により破損した場合は前述の(要件1)と(要件2)を満たすことができなくなるが、その場合は、OpenFlow コントローラを冗長化したり制御ラインをネットワーク化(多重化)したりすることで、集中制御を継続するアプローチを取り入れることを検討する。あわせて、各スイッチが自律的に提案手法に基づいてネットワークを制御する方法も検討することで、より実用的な手法を目指していく。

参考文献

[1] 地方公共団体におけるクラウド導入の取組(平成28年度改訂版), 地方公共団体情報システム機構(オンライン), 入手先(https://www.j-lis.go.jp/data/open/cnt/3/2427/1/2_Capter2.H28.pdf) (参照 2018-06-25).

[2] 医療・介護・健康分野のICT化への取り組み, 総務省(オンライン), 入手先(<https://ogc.or.jp/wp/wp-content/uploads/2016/02/6-1-Panel.MrYoshida.pdf>) (参照 2018-06-25).

[3] Kobayashi, M.: Experience of infrastructure damage caused by the Great East Japan Earthquake and countermeasures against future disasters, *IEEE Communications Magazine*, Vol.52, No.3, pp.23-29 (2014).

[4] 医療情報化タスクフォースで議論した取り組みに対する災害対応の観点からの評価(東日本大震災の経験を踏まえて), 首相官邸(オンライン), 入手先(<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/iryoujyouthou/pdf/houkokusho.betsu.pdf>) (参照 2018-06-25).

[5] 東日本大震災における政府機関の情報システムに対する被害状況調査及び分析, 内閣官房情報セキュリティセンター(オンライン), 入手先(https://www.nisc.go.jp/inquiry/pdf/shinsai_report.pdf) (参照 2018-06-25).

[6] Nakanura, T., Matsumoto, S. and Muraoka, H.: Discreet Method to Match Safe Site-Pairs in Short Computation Time for Risk-Aware Data Replication, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E98.D, No.8, pp.1493-1502 (2015).

[7] 江戸麻人, 和泉 諭, 阿部 亨, 菅沼拓夫: 災害リスクを考慮したネットワークの経路制御手法の提案と評価, 電気学会論文誌 C, Vol.137, No.3, pp.532-541 (2017).

[8] Ferdousi, S., Tornatore, M., Habib, M.F. and Mukherjee, B.: Rapid data evacuation for large-scale disasters in optical cloud networks, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol.7, No.12, pp.B163-B172 (2015).

[9] Lu, P., Ling, Q. and Zhu, Z.: Maximizing Utility of Time-Constrained Emergency Backup in Inter-Datacenter Networks, *IEEE Communications Letters*, Vol.20, No.5, pp.890-893 (2016).

[10] Ma, L., Su, W., Wu, B., Taleb, T., Jiang, X. and Shiratori, N.: ϵ -time early warning data backup in disaster-aware optical inter-connected data center networks, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol.9, No.6, pp.536-545 (2017).

[11] Nakamura, H., Horiuchi, S., Wu, C., Yamamoto, S. and Rydelek, P.A.: Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol.36, No.5 (2009).

[12] 越村俊一: リアルタイム津波浸水・被害予測と災害情報の配信: G 空間防災システムと L アラートの連携による減災力強化, 情報管理, Vol.59, No.12, pp.822-828 (2017).

[13] National Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (online), available from (<http://www.nhc.noaa.gov>) (accessed 2018-06-25).

[14] 田中 博: 災害時と震災後の医療 IT 体制 そのグランドデザイン, 情報管理, Vol.54, No.12, pp.825-835 (2012).

[15] 黒田知宏, 木村映善, 松村泰志, 山下芳範, 平松治彦, 糸直人: 秘密分散技術を用いた HIS バックアップクラウド環境の実現性評価, 医療情報学, Vol.33, No.4, pp.225-233 (2013).

[16] Robert W.F.: Algorithm 97: Shortest path, *ACM Communications Magazine*, Vol.5, No.6, p.345 (1962).

[17] Cetinkaya, E.K., Alenazi, M.J.F., Cheng, Y., Peck A.M. and Sterbenz J.P.G.: On the fitness of geographic graph generators for modelling physical level topologies, *Proc. 2013 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pp.38-45 (2013).

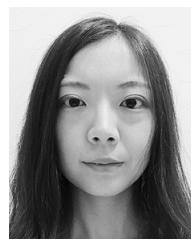
[18] OpenFlow, Open Networking Foundation (online), available from (<https://www.opennetworking.org>) (accessed 2018-06-25).

[19] 高機能高可用性情報ストレージ基盤技術の開発(オンライン), 入手先(<http://www.it-storage.riec.tohoku.ac.jp/>) (参照 2018-10-03).



高平 寛之

2018年3月東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年株式会社日立製作所入社。在学中は Software Defined Network に関する研究開発に従事。



畑 美純 (学生会員)

2017年3月東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在、東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程在学中。ワイヤレスネットワーク, SDN 技術, 端末モビリティマネジメント等の研究開発に従事。



ギリエ ルイス (学生会員)

2012年ブリュッセル自由大学修士課程修了。現在、東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程在学中。SDN, HCI, IoT, グリーン ICT 等の研究開発に従事。



和泉 諭 (正会員)

2012年3月東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(情報科学)。2009年(独)日本学術振興会特別研究員(DC1)。現在、東北大学大学院情報科学研究科特任准教授。知識処理, グリーン ICT, 耐災害ネットワーク等の研究開発に従事。



阿部 亨 (正会員)

1990年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。工学博士。東北大学情報処理教育センター助手, 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授を経て, 現在, 東北大学サイバーサイエンスセンター准教授。知識処理, パターン認識の研究開発に従事。



菅沼 拓夫 (正会員)

1997年3月千葉工業大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年東北大学電気通信研究所助手。同大学助教授, 准教授を経て, 2010年から東北大学サイバーサイエンスセンター教授。エージェント指向コンピューティング, 共生コンピューティング, 新世代ネットワーク管理等の研究開発に従事。