

情報指向ネットワークにおける ネットワーク障害時のコンテンツ可用性の解析

中村 遼[†] 上山 憲昭[†]

[†] 福岡大学 工学部

〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: †{r-nakamura,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年、データを送受信するホストではなくデータそのものを中心としたネットワークである情報指向ネットワークが注目を浴びている。一般に、情報通信ネットワークのような通信ネットワークは、攻撃や災害に起因するネットワーク障害に対して堅牢であることが求められる。従来のホスト指向ネットワーク（例：TCP/IP ネットワーク）の堅牢性における主な指標は、ネットワーク障害後のネットワークにおけるノード間の到達性などであるが、情報指向ネットワークの堅牢性における鍵となる指標はコンテンツ可用性である。しかし、従来のホスト指向ネットワークと比較して、情報指向ネットワークは複雑なネットワークアーキテクチャであるため、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性を分析することは容易ではない。本稿では、任意の情報指向ネットワークを対象とし、各ノードの除去率が与えられた時のコンテンツ可用性を解析的に導出する。具体的には、ノードからコンテンツを保有するリポジトリ（コンテンツサーバ）までの経路が単一もしくは複数である場合の、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性をそれぞれ解析的に求める。さらに、いくつかの数値評価により、ネットワークの構造やネットワーク障害のパターン・規模が情報指向ネットワークのコンテンツ可用性に与える影響を調査する。その結果、ネットワーク障害のパターンに依らず、ICN におけるコンテンツキャッシングや複数経路を利用することにより、コンテンツ可用性が大幅に改善されることや、ランダムなノード除去と比較して、クラスター型ノード除去の方がコンテンツ可用性が失われやすいことなどを示す。

キーワード 情報指向ネットワーク、コンテンツ可用性、ネットワーク障害、ネットワークの堅牢性、ノード除去

Analysis of Content Availability at Network Failure in Information-Centric Networking

Ryo NAKAMURA[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1 Nanakuma, Jonan, Fukuoka, Fukuoka 814-0180, Japan

E-mail: †{r-nakamura,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

Abstract In recent years, ICN (Information-Centric Networking) has been under the spotlight as a network that mainly focuses on transmitted and received data rather than on the hosts that transmit and receive data. Generally, the communication networks such as the ICN are required to be robust against network failures caused by attacks and disasters. One of the metrics for the robustness of conventional host-centric networks, e.g., the TCP/IP networks, is *reachability* between nodes in the network after network failures, whereas, the key metric for the robustness of the ICN is *content availability*. However, because the ICN is a more complicated network architecture compared to conventional host-centric networks, it is not easy to analyze the content availability at network failures in the ICN. In this paper, we focus on an arbitrary ICN network and derive the content availability for a given probability of node removal. Especially, we analytically obtain the average content availability over an entire network in the case that just a single path from a node to a repository, i.e., contents server, storing contents is available and that multiple paths to the repository are available, respectively. Furthermore, through several numerical evaluations, we investigate the effect of the structure of network topology as well as the pattern and scale of the network failures on the content availability in the ICN. Our findings include that, regardless of patterns of network failures, the content availability is significantly improved by caching contents at routers and using multiple paths, and that the content availability is more degraded at cluster-based node removal compared with random node removal.

Key words Information-Centric Networking (ICN), Content Availability, Network Failure, Network Robustness, Node Removal

1 はじめに

近年、データを送受信するホストではなくデータそのものを中心としたネットワークである情報指向ネットワークが注目を浴びている [1]。情報指向ネットワークを実現する代表的なネットワークアーキテクチャとして、CCN (Content-Centric Networking) [2] や NDN (Named Data Networking) [3] が存在する。CCN や NDN などの情報指向ネットワークでは、ネットワーク中のルータは転送したデータを自身のバッファメモリに一時的に保持できるため、利用者はリポジトリ（コンテンツサーバ）だけでなくルータからもデータを取得することができる。このため、情報指向ネットワークでは、コンテンツ配送遅延の短縮やコンテンツ可用性の向上などが期待されている。

一般に、情報指向ネットワークのような通信ネットワークは、攻撃や災害に起因するネットワーク障害に対して堅牢であることが求められる。ネットワーク障害が発生したとしても、ネットワークの機能が容易に失なわれないように、事前に堅牢な

ネットワークを設計する必要がある。また、ネットワーク障害により、一部のルータやリンクが利用できない状況になった場合には、正常に動作しているネットワーク内でその機能を維持する必要がある。

従来のホスト指向ネットワーク（例：TCP/IP ネットワーク）の堅牢性における主な指標は、ネットワーク障害後のネットワークにおけるノード間の到達性などであるが、情報指向ネットワークの堅牢性における鍵となる指標はコンテンツ可用性である。情報指向ネットワークはキャッシュネットワークの一種であるため、ネットワーク障害によりネットワークが分断された場合にも、利用者は正常に稼動しているルータからコンテンツを取得できる。従って、情報指向ネットワークでは、ネットワーク障害後にネットワークがどの程度接続されているかではなく、コンテンツをどの程度取得できるかが重要な指標となる。

しかし、従来のホスト指向ネットワークと比較して、情報指向ネットワークは複雑なネットワークアーキテクチャであるため、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコン

テンツ可用性を分析することは容易ではない。例えば、シミュレーションでは、情報指向ネットワークにおけるコンテンツ配送の挙動だけでなくネットワーク障害の挙動をシミュレートする必要がある。ネットワーク障害時のコンテンツ可用性を分析するためには、様々な条件(例: ネットワークトポロジやネットワーク障害のパターン・規模)の組み合わせを変化させながら実験を行う必要があるため、膨大な計算量が必要となることが予想される。

これまで、数学的解析により、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性が分析されている [4], [5]。具体的には、小規模なネットワークトポロジや中規模な階層型トポロジを対象とし、ネットワーク中のリンク除去率を等しく変化させた時のコンテンツ可用性が明らかにされている。

ただし、上述した従来研究で対象とされているネットワークやネットワーク障害のパターンが限定的であり、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性は十分に理解されていない。ネットワークの堅牢性に関する従来研究では、ネットワークトポロジやネットワーク障害のパターンなどの要因がネットワークの堅牢性に大きな影響を与えることが知られている。このため、これらの要因と情報指向ネットワーク固有の要因を考慮した上で、ネットワーク障害時のコンテンツ可用性を分析する必要がある。

本稿では、任意の情報指向ネットワークを対象とし、各ノードの除去率が与えられた時のコンテンツ可用性を解析的に導出する。具体的には、文献 [4] の解析手法を拡張することにより、ノードからコンテンツを保有するリポジトリまでの経路が単一もしくは複数である場合の、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性をそれぞれ求める。さらに、いくつかの数値評価により、ネットワークの構造やネットワーク障害のパターン・規模が情報指向ネットワークのコンテンツ可用性に与える影響を調査する。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 節では、情報指向ネットワークを含めたネットワークの堅牢性に関する従来研究を紹介する。3 節では、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性を導出する。4 節では、ネットワークの構造やネットワーク障害のパターン・規模やを様々に変化させた時の、情報指向ネットワークにおけるコンテンツ可用性を分析する。最後に 5 節では、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

ネットワークの堅牢性は、グラフ理論およびネットワーク科学の分野において精力的に研究されている。これらの研究は、ネットワーク中のノードやリンクの除去に対して、ネットワークの接続性がどのように失われるかを数理的もしくは実験的に調査している。

ネットワーク科学では、ネットワークトポロジが有するスケールフリー性がネットワークの堅牢性に与える影響が議論されている [6], [7]。文献 [6] は、ネットワーク中の一定割合のノードを除去した時の、ネットワークの直径や最大連結成分の大きさを求めている。その結果、ランダムネットワークと比較して、スケールフリーネットワークは、ランダムなノード除去に対しては堅牢であるが、恣意的な攻撃に対しては脆弱であることが示されている。また、文献 [7] は、次数や媒介中心性に基づいて、ノードやリンクをランダムに除去した時の、ランダムネットワークやスケールフリーネットワークの堅牢性を調査している。分析に用いられたネットワークの中では、トポロジ構造に偏りの小さいランダムネットワークが恣意的な攻撃に対して最も堅牢であることが報告されている。

近年では、情報指向ネットワークの堅牢性を明らかにする研究もはじまっており、ネットワーク障害時のコンテンツ可用性が分析されている [4], [5]。文献 [4] では、任意の情報指向ネットワークを対象とし、リンクの故障率が与えられた時のコンテンツ可用性を導出している。数値例により、情報指向ネットワークにおけるコンテンツキャッシングによって、要求頻度の高いコンテンツに対する可用性が改善されることが示されている。文献 [5] では、リンクの故障率が与えられた時の、階層型ネットワークトポロジにおけるコンテンツ可用性を導出している。1,000 ノード規模の階層型ネットワークトポロジにおいて、リンクの故障率を変化させた時のコンテンツ可用性を求めることにより、リンクの故障率が大きい場合には、コンテンツキャッシングによって、コンテンツ可用性が 10% 程度改善されることが示されている。ただし、これらの研究では、ネットワーク障害が発生した時点のコンテンツ可用性に着目している。ネットワーク障害によりネットワーク中の経路が分断されたとして

も、ルーティングプロトコル(例: NLSR: Named-data Link State Routing Protocol [8])により探索された代替経路を利用することで、リポジトリへの経路に対する到達性が回復する場合がある。そこで、本稿では、単一の経路だけではなく複数の経路が与えられた時のコンテンツ可用性を導出することで、ネットワーク障害後のルーティングプロトコルによる挙動を考慮したコンテンツ可用性の分析を行う。

さらに、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性の分析だけでなく、ネットワーク障害により可用性が損失したコンテンツに対する可用性を回復させる手法が提案されている [9], [10]。文献 [9] は、災害などによりネットワークが分断されることで、オリジナルコンテンツへの到達性が失われた場合に、要求パケットのルーティングを適切に制御することで、利用者によるコンテンツの取得が可能となる手法が提案している。また、文献 [10] では、リポジトリが保持しているコンテンツの可用性が失われた場合には、ネットワーク中のルータにキャッシュされているコンテンツの複製をオリジナルに昇格させ、当該ルータに要求パケットが転送されるように、ルータにおけるルーティングテーブルを更新する手法を提案している。提案手法によって、可用性損失コンテンツに対する可用性が 5%-20% 程度回復することがシミュレーションにより示されている。

3 解析

本節では、任意の情報指向ネットワークの性能解析 [4] を拡張し、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性を導出する。解析モデルなどの詳細は文献 [4] を参照されたい。

3.1 ネットワークモデル

複数のルータおよび複数のリポジトリから構成される情報指向ネットワークを無向グラフ $G = (V, E)$ と表記する。以降では、ルータおよびリポジトリを単にノードと呼ぶ。

ネットワーク中に存在するコンテンツ集合を C と表記する。また、全てのノードにおけるキャッシュサイズを等しく B と表記する。ノードには一台のエンティティ(要求者)が直接接続されており、ノード v に接続されているエンティティはコンテンツ $c \in C$ に対する要求レート $\lambda_{c,v}$ に従って、コンテンツ取得要求を繰り返し送出するものとする。

ノード v からコンテンツ c を保有するリポジトリ s_c までの K 本の経路から構成される経路候補を P_v^c と表記する。経路候補における k 番目の経路を $P_v^c[k]$ と表記し、要素番号の順に従って、経路が優先的に使用されるものとする。特に断りのない限り、デフォルトの経路として、1 番目の経路 $P_v^c[1]$ を形成するように、各ノードにおけるルーティングテーブル(CCN [2] や NDN [3] における FIB (Forwarding Information Base)) が適切に設定されているものとする。経路 $P \in P_v^c$ に対して、 $P[n]$ は経路 P における n 番目のノードを表す。経路候補に含まれるいずれの経路においても、 $P[1]$ はノード v であり、 $P[|P|]$ はリポジトリ s_c である。また、 $|P|$ は経路の大きさ(つまり、経路を構成するノード数)である。

本稿では、ノード除去を対象とし、ネットワーク障害により、ノード v がネットワークから除去される確率(ノード除去率)を r_v と表記する。ただし、リポジトリはネットワーク障害によるノード除去の対象外とみなし、 $r_{s_c} = 0$ とする。

本稿では、リンクにおける通信帯域は十分大きいものとし、ノードにおけるバッファあふれによる要求/応答パケットの損失は発生しないと仮定する。

3.2 コンテンツ可用性

まず、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性を定式化する。ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性を A と表記する。また、ノード v におけるコンテンツ c に対する可用性を A_v^c と表記する。以降の 3.3 節および 3.4 節において、単一の経路が与えられた場合 ($K = 1$) のコンテンツ可用性と、複数の経路が与えられた場合 ($K \geq 2$) のコンテンツ可用性をそれぞれ導出する。

ノード v におけるコンテンツ可用性 A_v は、ノード v におけるコンテンツ c に対する要求レート $\lambda_{c,v}$ と、ノード v におけるコンテンツ c に対する可用性 A_v^c の重み付き平均により与えられる [4]。

$$A_v = \sum_{c \in C} \frac{\lambda_{c,v} A_v^c}{\sum_{c' \in C} \lambda_{c',v}} \quad (1)$$

従って、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性 A は、ノード数 $N(=|V|)$ を用いて、

$$A = \frac{\sum_{v \in V} A_v}{N} \quad (2)$$

である。

3.3 単一経路の場合のコンテンツ可用性

次に、単一の経路が与えられた場合 ($K = 1$) の、ネットワーク障害時のコンテンツ可用性を導出する。この場合のコンテンツ可用性は、ネットワーク障害が発生した直後のコンテンツ可用性に相当する。以下では、ノード v からコンテンツ c を保有するリポジトリまでの経路 P が与えられた時の、ノード v におけるコンテンツ c に対する可用性 $A_v^c(P)$ を考える。

ノード v から送出されたコンテンツ c に対する要求パケットに対応する応答パケットが、経路 P における n 番目のノードから返送される確率を $\eta_v^c(P, n)$ と表記する。 n 番目のノード (ルータもしくはリポジトリ) からコンテンツが返送されるのは、経路 P 上の 1 番目から $n-1$ 番目までのノードでキャッシュヒットせずに、 n 番目のノードでキャッシュヒットする場合である。従って、ノード v におけるコンテンツ c に対するキャッシュヒット率 $q_{c,v}$ を用いて、

$$\eta_v^c(P, n) = q_{c,P[n]} \prod_{i=1}^{n-1} (1 - q_{c,P[i]}) \quad (3)$$

である [4]。キャッシュ置き換えアルゴリズムが LRU (Least Recently Used) や FIFO (First-In First-Out) である場合、ネットワーク中の各ルータにおけるキャッシュヒット率は MCA (Multi-Cache Approximation) アルゴリズム [11] などにより近似的に求められる。

ネットワーク障害により (一部の) ノードが除去された後に、経路 P において、1 番目のノードから n 番目のノードまでの経路が確立されている確率 (1 番目から n 番目まで全てのノードが残存している確率) を $\rho(P, n)$ と表記すると、 $\rho(P, n)$ は、

$$\rho(P, n) = \prod_{i=1}^n (1 - r_{P[i]}) \quad (4)$$

である。

ネットワーク中のノードが除去された後に、ノード v がコンテンツを正常に取得できるのは、経路 P 上における、ノード v からコンテンツ c を返送するノードまでの全てのノードが残存している場合である。このため、 n 番目のノードからコンテンツ c を返送する確率 $\eta_v^c(P, n)$ と、 n 番目のノードまで経路が確立されている確率 $\rho(P, n)$ を用いて、 $A_v^c(P)$ は以下のように与えられる。

$$A_v^c(P) = \sum_{n=1}^{|P|} \eta_v^c(P, n) \rho(P, n) \quad (5)$$

以上から、単一の経路 (デフォルト経路) $P_v^c[1]$ が与えられた場合には、ノード v におけるコンテンツ c に対する可用性 A_v^c は $A_v^c(P_v^c[1])$ である。

3.4 複数経路の場合のコンテンツ可用性

最後に、ノードからコンテンツを保有するリポジトリまでの複数の経路が与えられた場合 ($K \geq 2$) のコンテンツ可用性を導出する。

ネットワーク障害後のネットワークにおいて、経路候補 P_v^c に含まれるいずれかの経路を利用して、ノード v から送出されたコンテンツ c に対する要求パケットがリポジトリ s_c に到達できる確率 (到達性) を $R_{c,v}$ と表記する。本稿では、経路候補 P_v^c におけるいずれかの経路がリポジトリに到達可能である場合には、ノード v からコンテンツ c に対する到達性があるのみならず、経路候補における全ての経路のリポジトリへの到達性が失われている場合には、ネットワーク中のノードのキャッシュからコンテンツが返送される可能性を考慮した上で代替経路を適切に決定する必要があるが、本稿では、簡単化のため、デフォルト経路 ($P_v^c[1]$) をそのまま使用するものとする。

ネットワーク障害が発生した後に、 k 番目の経路 $P (= P_v^c[k])$ において、1 番目のノードと $|P| - 1$ 番目のノード (リポジトリに接続されているノード) を除くいずれかの中継ノードが除去されている場合に、 $k+1$ 番目の経路が代替経路の候補となる。中継ノード (経路 P における 2 番目から $|P| - 2$ 番目までのノード) が除去されることにより、経路 $P \in P_v^c$ が分断される確率 $\psi(P)$ は次式で与えられる。

$$\psi(P) = 1 - \prod_{i=2}^{|P|-2} (1 - r_{P[i]}) \quad (6)$$

ノード v におけるコンテンツ c に対する経路候補 P_v^c において、1 から $k-1$ 番目の経路が全て分断されており、 k 番目の経路が確立されている確率 $R_{c,v}^k$ は、

$$R_{c,v}^k = \phi(P_v^c[k]) \prod_{i=1}^{k-1} \psi(P_v^c[i]) \quad (7)$$

で与えられる。上式において、 $\phi(P)$ は、経路 P が確立されている確率 (経路 P におけるいずれのノードも除去されない確率) であるため、 $\phi(P) = \prod_{i=1}^{|P|} (1 - r_{P[i]})$ である。

ノード v におけるコンテンツ c に対する到達性 R_v^c は、経路候補 P_v^c のうちいずれかの経路がリポジトリに到達できる確率であるから、

$$R_{c,v} = \sum_{k=1}^{|P_v^c|} R_{c,v}^k \quad (8)$$

である。

複数の経路が与えられた場合のコンテンツ可用性は、リポジトリから返送されるコンテンツに対する可用性と、ノードのキャッシュから返送されるコンテンツに対する可用性によって与えられる。リポジトリへの到達性がある場合には、コンテンツ可用性は 1 である。一方、リポジトリへの到達性が失われている場合には、コンテンツ可用性は、デフォルト経路からリポジトリを除いた経路に対するコンテンツ可用性に相当する。従って、複数経路時のコンテンツ可用性 A_v^c は次式で与えられる。

$$A_v^c = 1 \times R_{c,v} + A_v^c(P^*) \times (1 - R_{c,v}) \quad (9)$$

ここで、 P^* は、デフォルト経路である $P_v^c[1]$ からリポジトリを除いた経路である。

4 数値評価

本節では、いくつかの数値評価により、ネットワーク障害のパターン・規模や、ネットワークの構造が情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性に与える影響を調査する。

4.1 条件

本数値評価では、3 種類のネットワークトポロジ (ランダムネットワーク、ツリー状トポロジ、グリッドトポロジ) と、2 種類の ISP のネットワークトポロジ (ATT と GEANT) を用いた。本数値評価に用いたネットワークの特性を表 1 に示す。本稿では、ノード間の距離を考慮したネットワーク障害のパターンを対象とするため、3 種類のネットワークトポロジでは、ノードを 1×1 の平面フィールドに配置することにより、ノード間の距離を与えた。

本数値評価で用いたネットワークの詳細はそれぞれ以下の通りである。

• ランダムネットワーク

ER (Erdős-Rényi) モデル [12] を拡張したネットワーク生成モデルを利用し、ノード間の距離に基づいたランダムネットワークを生成した。ノード数 N および平均時数 $\bar{k}$ のランダムネットワークを以下の手順により生成する; (1) 平面フィールド上に N 個のノードを一様分布によりランダムに配置する; (2) 全ノードペア間の距離 $d(u, v)$ を計算する; (3) $1/d(u, v)^\theta$ に比例する確率でノードペア (u, v) をランダムに選択し、 (u, v) 間にリンクを付与する; (4) リンク数が $|E| (= N\bar{k}/2)$ になるまで (3) を繰り返す。ここで、手順 (3) における $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$ はノードペア間の距離による影響を調整するパラメータである。 $\theta = 0$ の場合には、ノードペアを等確率で選択するため、本ネットワーク生成モデルは ER モデルと等価である。本数値評価では、ノード数 $N = 100$ 、平均次数 $\bar{k} = 4$ のランダムネットワークを生成し、生成されたネットワークのうち、連結されたネットワークのみを使用した。

• ツリー状トポロジ

ツリーを基礎としたネットワークを以下の手順により生成した; (1) 与えられた m に対して、完全 m 分木を生成する; (2) 根

表1 本数値評価で用いたネットワークの特性

	ランダムネットワーク			ツリー状トポロジ ($p = 0.5$)		グリッドトポロジ	ATT	GEANT
	$\theta = 0$	$\theta = 0.5$	$\theta = 1$	$m = 2$	$m = 3$			
ノード数	100	100	100	100	100	100	93	37
リンク数	200	200	200	144	143	180	155	58
平均次数	4.00	4.00	4.00	2.88	2.86	3.60	3.33	3.14
次数の標準偏差	2.06	1.76	2.00	1.21	1.31	0.57	4.58	1.88
平均経路長	2.75	2.39	2.57	3.36	2.47	5.82	2.27	1.90
クラスタリング係数	0.04	0.03	0.05	0.23	0.38	0.00	0.36	0.21

ノードをフィールドの中央に配置し、 h 段目に位置するノードを半径 $(h-1)/h_{max}$ の円周上に等間隔で配置する; (3) ノード数が N になるまで、 h_{max} 段目に位置する葉ノードをランダムに取り除くという操作を繰り返す; (4) リンク付与確率 p に基づいて、 h 段目に位置する隣接ノード間においてリンクをランダムに付与する。 $p = 0$ の場合のツリー状トポロジは完全 m 分木となる。情報指向ネットワークの性能評価では、完全 m 分木を一般的には用いる [13]。しかし、本数値評価では、ノードからリポジトリに複数の経路が与えられた場合のコンテンツ可用性に着目するため、 $p = 0.5$ のツリー状トポロジを用いた。

- グリッドトポロジ

10×10 の規則的な格子状のトポロジを用いた。グリッドトポロジでは、ノード間の距離が等しくなるように全てのノードをフィールド上に配置する。

- ISP ネットワークトポロジ

CAIDA (Center for Applied Internet Data Analysis) プロジェクト [14] が公開しているデータセットに含まれる ATT と、Internet Topology Zoo [15] における GEANT を使用した。

与えられたネットワークトポロジにおいて、単一のリポジトリを次数が最も高いノードに接続し、リポジトリには 1,000 種類のコンテンツを配置した。ただし、ツリー状トポロジの場合には、ツリーの根に位置するノードにリポジトリを接続した。ネットワーク中のエンティティはリポジトリが保有するコンテンツに対して、コンテンツ要求を送出する。エンティティがコンテンツ c を要求するレート $\lambda_{c,v}$ は、文献 [5], [10] で用いられている、パラメータ 0.8 の Zipf 分布で与えた。

ノードにおけるキャッシュ置き換えアルゴリズムは LRU とし、ノードのキャッシュサイズ B を 0-100 [content] と変化した。与えられた条件下 (例: ネットワークトポロジやキャッシュサイズ) で、MCA アルゴリズム [11] を利用することにより、ノード v におけるコンテンツ c に対するキャッシュヒット率 $q_{c,v}$ を求めた。

ノード v からコンテンツ c を保有するリポジトリまでの経路候補 P_v^c は、ノード v からリポジトリまでの全経路において、経路長が短い上位 K 本の経路を与えた。ただし、経路長が同一である経路が複数存在した場合には、ノードに割り当てられた識別子に基づいて、使用する経路を選択した。本数値評価では、 $K = 3$ を用いた。

本稿では、2通りのネットワーク障害パターン (ランダムなノード除去とクラスタ型ノード除去) を対象とし、ノード v の除去率 r_v を以下のように与えた。

- ランダムなノード除去

ルータの故障を想定し、ネットワーク中のノードをランダムに除去する。本数値評価では、ノード v の除去率 r_v を等しく r とした。

- クラスタ型ノード除去

災害によるルータやリンクの破損を想定し、ネットワーク障害の中心となるノードから半径 D の円内に位置する全てのノードを除去する。本数値評価では、障害半径 D に対して、与えられたネットワークトポロジにおけるノード v の除去率 r_v を以下のように計算した。まず、ネットワーク障害の中心であるノード u から半径 D の円内に位置するノード集合を V_u^D と表記し、ノード v がノード集合 V_u^D に含まれているかを以下の二値関数によって表す。

$$\delta_u^D(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } v \in V_u^D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

二値関数 $\delta_u^D(v)$ を用いて、中心ノード u をネットワーク中の全ノードに変化させた時のノード除去の有無の平均を求めることによって、ノード除去率 r_v を与えた。

$$r_v = \frac{\sum_{u \in V} \delta_u^D(v)}{N} \quad (11)$$

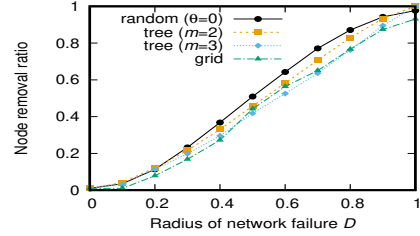


図1 ネットワーク障害の半径とノード除去割合の関係

クラスタ型ノード除去によって除去されたノードの割合と、ランダムなノード除去におけるノード除去率との関係を確認するため、クラスタ型ノード除去において、障害半径を変化させた時のノード除去割合 (全ノードにおけるノード除去率 r_v の平均) を図1に示す。

4.2 結果

4.2.1 ランダムなノード除去に対するコンテンツ可用性

まず、ランダムネットワーク ($\theta = 0$) における、ノード除去率を変化させた時のネットワーク全体のコンテンツ可用性を図2に示す。図2(a) および図2(b) は単一経路時のコンテンツ可用性および複数経路時のコンテンツ可用性をそれぞれ示している。複数経路を利用することによりコンテンツ可用性がどの程度改善されるかを明示的に示すため、図2(c)に、コンテンツ可用性の改善率 (複数経路時のコンテンツ可用性 / 単一経路時のコンテンツ可用性) を示している。これらの図中には、ノード (ルータ) のキャッシュサイズ B を変化した時の結果を示している。

図2(a) および図2(b) より、ノード除去率の増加に対して、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性は急激に失われることがわかる。また、ネットワーク可用性 ($B = 0$ の時のコンテンツ可用性) と比較して、キャッシュサイズが大きい場合 ($B = 50$ や $B = 100$) には、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性は大きく改善されるが、キャッシュサイズが小さい場合 ($B = 10$) には、コンテンツ可用性はほとんど改善されないことがわかる。さらに、図2(c)より、ノードのキャッシュサイズに依らず、複数経路を利用することでコンテンツ可用性が改善されていることがわかる。これは、ノード除去によりデフォルト経路が分断されたとしても、ノードからリポジトリへの到達可能な代替経路を利用することで、コンテンツ可用性が回復するためである。情報指向ネットワークにおけるコンテンツキャッシングにより、要求頻度が高い (人気度が高い) コンテンツはネットワーク中のノードから返送される可能性は高い。しかし、要求頻度が低い (人気度が低い) コンテンツは、当該コンテンツを保有するリポジトリから返送される可能性が高いため、代替経路を利用することによりリポジトリへの到達性が回復することで、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性は改善される。

4.2.2 クラスタ型ノード除去に対するコンテンツ可用性

ランダムネットワーク ($\theta = 0$) における、障害半径を変化させた時のネットワーク全体のコンテンツ可用性を図3に示す。図2と同様に、単一経路時のコンテンツ可用性および複数経路時のコンテンツ可用性を図3(a) および図3(b) にそれぞれ示す。また、複数経路によるコンテンツ可用性の改善率を図3(c)に示す。

図3より、障害半径の増加 (つまり、ノード除去率の増加) に対して、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性は急激に失われることがわかる。例えば、図1より、障害半径 D が 0.2 である場合のノード除去割合は 0.1 程度であることがわかる。従って、クラスタ型ノード除去の場合 (図3) における $D = 0.2$ のコンテンツ可用性と、ランダムなノード除去の場合 (図2) における $r = 0.1$ のコンテンツ可用性を比較すると、クラスタ型ノード除去の場合のコンテンツ可用性の方が全体的に小さい。

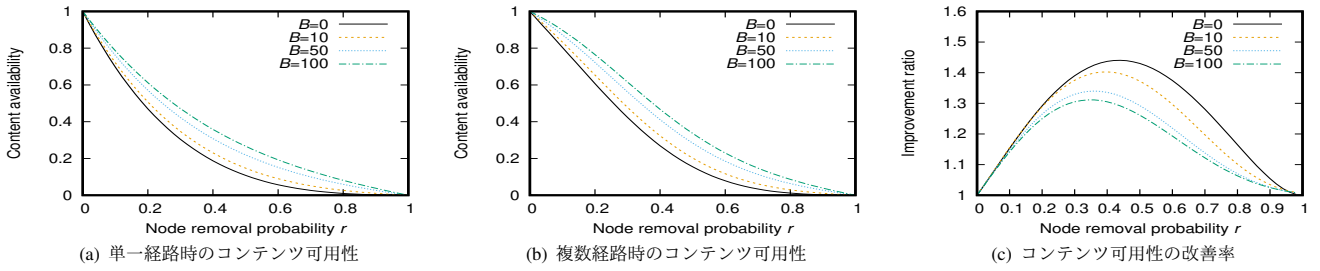


図2 ランダムネットワーク ($\theta = 0$) におけるノード除去率を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性

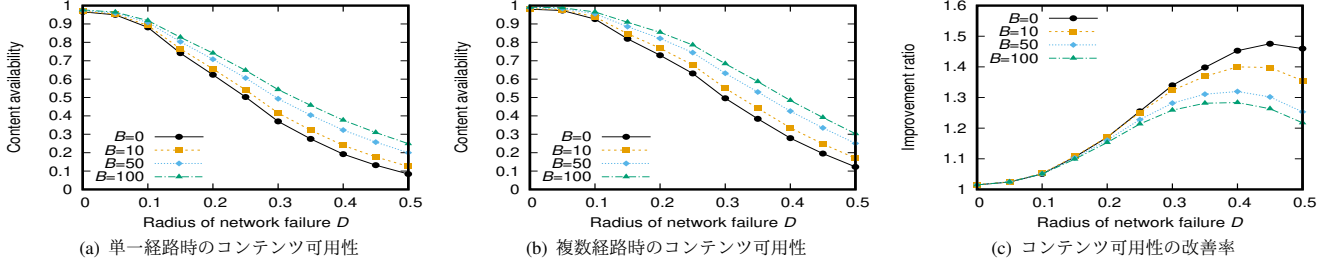


図3 ランダムネットワーク ($\theta = 0$) における障害半径を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性

つまり、ノード除去率にばらつきがある方が、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性は失われやすい。ただし、ランダムなノード除去の場合と同様に、クラスタ型ノード除去においても、コンテンツキャッシングや、複数の経路を利用することにより、コンテンツ可用性が改善されている。

4.2.3 ネットワークトポロジがコンテンツ可用性に与える影響

次に、ネットワークトポロジの構造がネットワーク障害時のコンテンツ可用性に与える影響を議論する。図4および図5に、ノード除去率を変化させた時のネットワーク全体のコンテンツ可用性および障害半径を変化させた時のネットワーク全体のコンテンツ可用性をそれぞれ示す。これらの図中には、ネットワークトポロジを変化させた時の結果を示しており、図中の「random」、「tree」、「grid」はランダムネットワーク、ツリー状トポロジ、グリッドトポロジの結果をそれぞれ表している。ただし、ランダムネットワークにおいて、調整パラメータ θ を変化させた時の結果に十分な差はなかったため、 $\theta = 0$ の場合の結果のみを「random」として図中に示している。

これらの結果から、ランダムなノード除去の場合には、 $m = 2$ のツリー状トポロジおよびグリッドトポロジと、 $m = 3$ のツリー状トポロジおよびランダムネットワークの間で、ネットワーク障害時のコンテンツ可用性に差があることがわかる。 $m = 2$ のツリー状トポロジおよびグリッドトポロジは、他のネットワークと比較して、平均経路長が長いネットワークであるため、ノード除去により（デフォルト）経路が比較的断絶されやすい。このため、 $m = 2$ のツリー状トポロジおよびグリッドトポロジにおける単一経路時のコンテンツ可用性は比較的低くなっている。ただし、 $m = 2$ のツリー状トポロジおよびグリッドトポロジでは、リポジトリに到達可能な複数の代替経路が存在するため、ノード除去率が低い場合や障害半径が小さい場合には、コンテンツ可用性が大幅に改善されている。

4.2.4 現実的な条件下におけるコンテンツ可用性

最後に、上述した傾向が現実のISPのネットワークトポロジに対しても維持されるかどうかを示す。図6に、ATTおよびGEANTにおいて、ノード除去率を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性を示す。また、図7に、障害半径を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性を示す。

これらの結果から、現実のISPネットワークトポロジに対しても、コンテンツキャッシングや、複数の経路を利用することにより、ネットワーク障害時におけるネットワーク全体の平均コンテンツ可用性が改善されていることがわかる。ただし、ATTやGEANTでは、他のネットワーク（例：ランダムネットワーク）と比較して、複数の経路を利用することによるコンテンツ可用性に対する恩恵は限定的であることがわかる。特に、ATTでは、高次数ノード（ハブノード）が存在することにより、ノードからリポジトリへの経路が特定のハブノードを通過する可能性

が高い。このため、複数の経路を利用したとしても、コンテンツ可用性は大きく改善されなかったと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、文献[4]の解析手法を拡張することによって、情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性を解析に導出した。具体的には、任意の情報指向ネットワークを対象とし、ノードからリポジトリの経路が単一もしくは複数である場合の、ネットワーク全体の平均コンテンツ可用性をそれぞれ解析的に求めた。さらに、いくつかの数値評価により、ネットワークの構造やネットワーク障害のパターン・規模が情報指向ネットワークのコンテンツ可用性に与える影響を調査した。その結果、ネットワーク障害のパターンに依らず、ICNにおけるコンテンツキャッシングや複数の経路を利用することにより、コンテンツ可用性が大幅に改善されることや、ランダムなノード除去と比較して、クラスタ型ノード除去の方がコンテンツ可用性が失われやすいことなどがわかった。

今後の課題として、大規模情報指向ネットワークにおけるネットワーク障害時のコンテンツ可用性の近似解析や、本解析手法を利用したキャッシング制御手法やルーティング制御手法の設計などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 18K11283 の助成を受けたものである。

文献

- [1] G. Xylomenos et al., “A survey of information-centric networking research,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, pp. 1024–1049, 2014.
- [2] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, “Networking named content,” in *Proceedings of the 5th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT 2009)*, pp. 1–12, Dec. 2009.
- [3] L. Zhang et al., “Named data networking,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, pp. 66–73, July 2014.
- [4] R. Nakamura and H. Ohsaki, “Performance analysis of content-centric networking on an arbitrary network topology,” *IEICE Transactions on Communications, Special Section on Internet Technologies to Accelerate Smart Society*, vol. E101-B, pp. 24–34, Jan. 2018.
- [5] E. Rietberg, L. D’Acunto, R. Kooij, and H. van den Berg, “Analyzing information availability in ICN under link failures,” in *Proceed-*

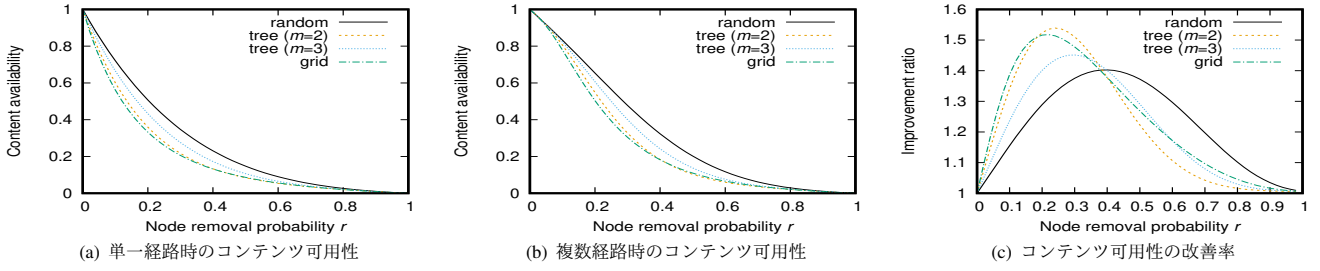


図4 ネットワークの構造がネットワーク全体の平均コンテンツ可用性に与える影響 (ランダムなノード除去, $B = 10$ [content])

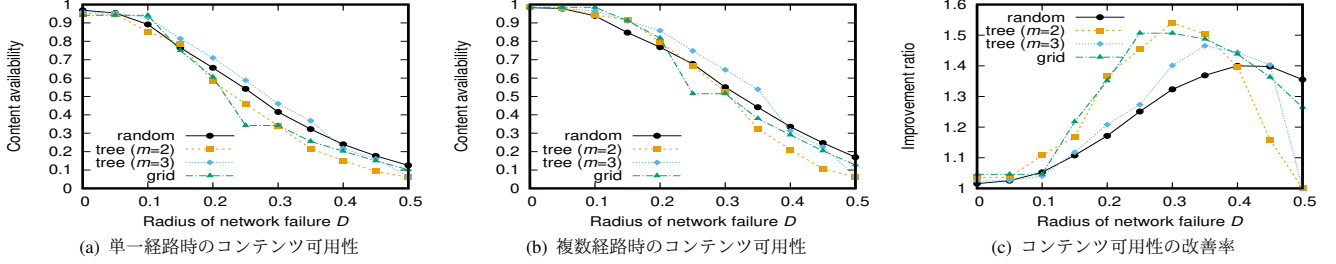


図5 ネットワークの構造がネットワーク全体の平均コンテンツ可用性に与える影響 (クラスタ型ノード除去, $B = 10$ [content])

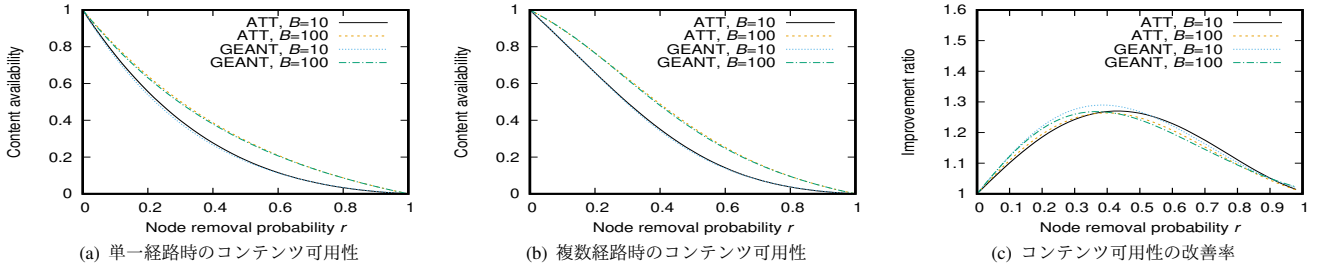


図6 ISP ネットワークトポロジにおけるノード除去率を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性

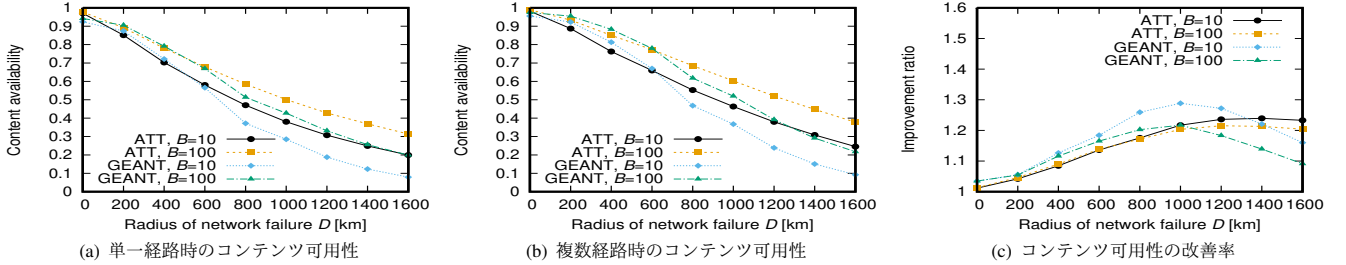


図7 ISP ネットワークトポロジにおける障害半径を変化させた時のネットワーク全体の平均コンテンツ可用性

ings of the 32nd International Conference on Information Networking (ICOIN 2018), pp. 199–204, Jan. 2018.

- [6] R. Albert, H. Jeong, and A.-L. Barabási, “Error and attack tolerance of complex networks,” *Nature*, vol. 406, pp. 378–382, July 2000.
- [7] P. Holme, B. J. Kim, C. N. Yoon, and S. K. Han, “Attack vulnerability of complex networks,” *Physical Review E*, vol. 65, pp. 056109–1–056109–14, May 2002.
- [8] A. K. M. M. Hoque, S. O. Amin, A. Alyyan, B. Zhang, L. Zhang, and L. Wang, “NLSR: Named-data link state routing protocol,” in *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN 2013)*, pp. 15–20, Aug. 2013.
- [9] V. Sourlas, L. Tassiulas, I. Psaras, and G. Pavlou, “Information resilience through user-assisted caching in disruptive content-centric networks,” in *Proceedings of International Conference on IFIP Networking 2015*, pp. 1–9, May 2015.
- [10] N. Kamiyama, “Recovering content availability at failures in ICN,”

in *Proceedings of the 16th IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM 2019)*, pp. 395–401, Apr. 2019.

- [11] E. J. Rosensweig, J. Kurose, and D. Towsley, “Approximate models for general cache networks,” in *Proceedings of the 29th Conference on Information Communications (INFOCOM 2010)*, pp. 1–9, Mar. 2010.
- [12] P. Erdős and A. Rényi, “On random graphs I,” *Mathematicae*, vol. 6, pp. 290–297, Nov. 1959.
- [13] S. K. Fayazbakhsh *et al.*, “Less pain, most of the gain: Incrementally deployable ICN,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2013*, pp. 147–158, Aug. 2013.
- [14] “CAIDA.” <https://www.caida.org/data/>. [accessed June 01, 2020].
- [15] S. Knight, H. X. Nguyen, N. Falkner, R. Bowden, and M. Roughan, “The internet topology zoo,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, pp. 1765–1775, Oct. 2011.