

キーワード型情報指向遅延耐性ネットワークの提案

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主体としたネットワークである情報指向ネットワーク (ICN: Information-Centric Networking) が注目を浴びている。本稿では、ICN を基礎とする無線ネットワークの中でも、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay-Tolerant Networking) に ICN の通信パラダイムを導入した情報指向遅延耐性ネットワーク (ICDTN: Information-Centric Delay-Tolerant Network) を対象とする。従来の ICN を含めた、ICN を基礎とする無線ネットワークアーキテクチャでは、コンテンツの名前に階層型構造で表現されるコンテンツ識別子を付与するが、コンテンツの名前をコンテンツ記述子 (複数のタグ) によって記述する手法が提案されている。ICDTN にコンテンツ記述子を利用したコンテンツ配送を導入することにより、DTN が対象とする環境において柔軟なコンテンツ要求の解決が期待できるため、ICDTN では、コンテンツ識別子ではなく、コンテンツ記述子を利用したコンテンツ配送を利用する方が適していると考えられる。そこで、本稿では、要求メッセージおよび応答メッセージに含まれるキーワード (コンテンツ記述子) を基に、コンテンツ要求を解決し、コンテンツ配送を実現するキーワード型 ICDTN を提案する。さらに、シミュレーションにより、提案手法であるキーワード型 ICDTN の基本的な特性を分析すると共に、キーワードを利用したコンテンツ配送の有効性を調査する。

キーワード 情報指向遅延耐性ネットワーク, 性能評価, 名前付与法, コンテンツ配送遅延, エピデミックルーティング

Proposal of Keyword-Based Information-Centric Delay-Tolerant Network

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, Information-Centric Networking (ICN), which focuses on the transferred data rather than the sending and receiving hosts, has attracted much attention. Among ICN-based wireless networks, in this paper, we focus on Information-Centric Delay-Tolerant Network (ICDTN), which incorporates the communication paradigm of ICNs into Delay-Tolerant Networking (DTN). ICN-based wireless network architectures including conventional ICNs adopt a naming scheme that names the content with the *content identifier* expressed as the hierarchical structure. However, a past study proposed an alternative naming scheme that describes the name of content with the *content descriptor*, i.e., a set of tags. We believe that, in ICDTN, it is more suitable to utilize the approach using the content descriptor rather than the content identifier, which enables flexible content discovery under the DTN environment. In this paper, we therefore propose *keyword-based ICDTN* that resolves content requests and deliveries contents based on keywords, i.e., content descriptor, included in the request message and the response message. Furthermore, through several simulations, we analyze the fundamental characteristics of our keyword-based ICDTN, and we also investigate the effectiveness of the content delivery using the keyword.

Key words Information-Centric Delay-Tolerant Network (ICDTN), Performance Evaluation, Naming Scheme, Content Delivery Delay, Epidemic Routing

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主体としたネットワークである情報指向ネットワーク (ICN: Information-Centric Networking) が注目を浴びている [1].

ICN を実現する主要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 は、要求パケットと応答パケットに含まれるコンテンツ識別子を基にした要求-応答型の通信モデルを利用することにより、コンテンツ配送を実現

する。このため、要求者は、コンテンツのオリジナルを保有するプロバイダ(リポジトリ)だけでなく、コンテンツの複製をキャッシュしているルータからコンテンツを取得することができる。

ICN の通信パラダイム(例: 名前ベースの通信モデル)は無線ネットワークにおいても有用であることが期待されているため、ICN の通信パラダイムを導入した無線ネットワークが精力的に研究されている [4]。例えば、IoT (Internet of Things) のような無線センサネットワークでは、ICN における名前ベースの通信により、単一のコンテンツ要求で複数のソースからコンテンツを取得できるため、多数の機器(例: センサ)が観測した IoT データを効率的に収集できることが期待されている [5]。また、MANET (Mobile Ad-hoc NETwork) や VANET (Vehicular Ad-hoc NETwork) のようなアドホックネットワークでは、要求パケットに対する複数経路ルーティングや応答パケットの集約により、コンテンツ配送の高信頼化や高効率化が期待されている [6]。

本稿では、ICN を基礎とする無線ネットワークの中でも、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay-Tolerant Networking) [7] に ICN の通信パラダイムを導入した情報指向遅延耐性ネットワーク (ICDTN: Information-Centric Delay-Tolerant Network) [8] を対象とする。これまで、DTN は、災害時のような通信インフラが利用できない状況下において、エンド-エンド間における信頼性のあるメッセージ配送を目指す通信方式として精力的に研究されている [9]。ICN の通信パラダイムを DTN に導入することにより、ICDTN では、利用者は、コンテンツを保有しているホストを特定することなく、コンテンツの名前を基にコンテンツを取得することができる。このため、DTN はプッシュ型通信であるのに対して、ICDTN はプル型通信とみなせる。プル型通信は、利用者が任意にコンテンツを取得できる受信側駆動の通信であり、例えば、災害時のような状況では、配信される情報によってはプル型通信を利用の方が望ましい。ただし、ICDTN において、コンテンツを要求するためには、そのコンテンツに対する識別子が不可欠であり、DTN のような通信インフラが利用できない環境では、要求者がコンテンツ識別子を正確に取得することは困難である。

従来の ICN を含めた ICN を基礎とする無線ネットワークアーキテクチャでは、コンテンツの名前に階層型構造で表現されるコンテンツ識別子を付与するが、TagNet と呼ばれる ICN を基礎としたネットワークアーキテクチャ [10] では、コンテンツの名前をタグ(コンテンツ識別子)により記述する。TagNet では、コンテンツ要求に含まれるタグを基に、コンテンツ要求の中継や集約を行うため、コンテンツ単位ではなくタグ単位でコンテンツの配送が可能となる。さらに、ICN の応用が様々なネットワークで検討されていることから、コンテンツの名前をタグによって付与することができれば、コンテンツプロバイダはコンテンツの名前を容易に定義することができる。

ICDTN では、コンテンツ識別子ではなく、文献 [10] で提案されているコンテンツ記述子を利用したコンテンツ配送を利用の方が適していると考えられる。通信インフラが利用できない状況で、要求者が正確なコンテンツ識別子を取得できないとしても、いくつかのタグから構成されるコンテンツ記述子を埋め込んだコンテンツ要求を要求者は送出することはできる。その結果、要求者は、コンテンツ識別子に依存することなく、コンテンツ記述子が部分的に一致するコンテンツを取得できる可

能性がある。

そこで、本稿では、要求メッセージおよび応答メッセージに含まれるキーワード(コンテンツ記述子)を基に、コンテンツ要求を解決し、コンテンツ配送を実現するキーワード型 ICDTN を提案する。キーワード型 ICDTN では、利用者はキーワードを埋め込んだコンテンツ要求をネットワーク中に送出し、コンテンツ要求は DTN における蓄積・運搬・中継 (store-carry-forward) 型通信により、ネットワーク中のノードに拡散される。コンテンツ要求に含まれるキーワードを基に発見されたコンテンツは、コンテンツ要求と同様の手法により、ネットワーク中のノードを転送されることで、要求者に配送されることを目指す。本稿で提案するキーワード型 ICDTN の位置付けを示すため、他のネットワークアーキテクチャ(例: ICDTN や TagNet) との関係を表 1 にまとめる。

本稿では、シミュレーションにより、提案手法であるキーワード型 ICDTN の基本的な特性を分析すると共に、キーワードを利用したコンテンツ配送の有効性を調査する。具体的には、要求メッセージと応答メッセージにおけるキーワード間の類似度に着目し、要求メッセージを送出してから、当該要求メッセージに対して与えられた類似度以上である応答メッセージを受信するまでの時間を計測することにより、キーワード型 ICDTN の特性を調査する。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 節では、ICDTN と、キーワードを利用した ICN アーキテクチャに関する従来研究を紹介する。3 節では、従来研究で提案されている ICDTN を紹介し、4 節では、本稿で提案するキーワード型 ICDTN を説明する。5 節では、シミュレーションにより、キーワード型 ICDTN の基本的な特性を調査する。最後に 6 節では、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

これまで、DTN と ICN を統合した様々な ICDTN アーキテクチャが提案されており、その有効性がシミュレーションや数学的解析により分析されている [8, 11, 12]。文献 [8] では、DTN に、ICN におけるコンテンツ識別子を利用した要求-応答型通信を導入した ICDTN を提案している。シミュレーションにより、ICN の通信パラダイムを DTN に導入する恩恵を調査した結果、ネットワーク中のノードがコンテンツを返送することにより、コンテンツ要求の解決に要した遅延や、応答メッセージの転送に要したホップ数が大幅に改善されることが示されている。文献 [11] では、キャッシュを有する複数の固定ノード(アクセスポイント)と複数の移動ノードから構成されるネットワークを対象とし、要求-応答型の通信によってコンテンツを配送する ICDTN アーキテクチャを提案している。シミュレーションにより、提案手法の有効性を調査した結果、固定ノードおよび移動ノードにおけるコンテンツキャッシングにより、コンテンツの取得に要する時間が大幅に削減されることが示されている。シミュレーションだけでなく数学的解析により、ICDTN の通信性能は分析されている。文献 [12] では、ICDTN における要求メッセージと応答メッセージの配送における動的過程をマルコフ連鎖によって記述し、コンテンツ配送遅延の分布を解析的に求めている。ただし、これらの ICDTN アーキテクチャではコンテンツ識別子を利用したコンテンツ配送を想定しているため、ICDTN におけるキーワードを利用したコンテンツ配送の

表1 キーワード型 ICDTN と他のネットワークアーキテクチャとの関係

		ルーティングテーブルによる転送		メッセージ複製による転送	
		プル型	プッシュ型	プル型	プッシュ型
情報指向	コンテンツ記述子	TagNet [10]	TagNet [10]	キーワード型 ICDTN ICDTN [8]	
	コンテンツ識別子	CCN [2] NDN [3]			
ホスト指向		従来の TCP/IP IP マルチキャスト		DTN [7]	

特性は十分に明らかにされていない。

少数ではあるが、コンテンツに付与する名前にキーワードやタグを利用した、ICN を基礎とするネットワークアーキテクチャが検討されている [10, 13]。文献 [10] では、ICN において、コンテンツの名前を階層型構造ではなく (順序性のない) タグの集合で付与することにより、プル型通信とプッシュ型通信の両方を可能とする TagNet を提案している。また、TagNet のためのルーティング方式・コンテンツ要求解決方式・輻輳制御機構を提案しており、ネットワークレベルからトランスポートレベルで TagNet の通信性能を評価している。さらに、文献 [13] では、文献 [10] の提案手法を応用することにより、IoT データの名前をキーワードの集合により記述した、ICN を基礎とする IoT ネットワークを提案している。具体的には、収集するデータの位置 (例: 建物) を特定する識別子・データ処理方法を示すキーワード・データに対するキーワードから構成される名前を付与する方法と、その名前付与法を利用したルーティング方式やデータの集約方法を提案している。提案手法の有効性を実験により評価した結果、複数の場所で生成された IoT データを集約しながら収集することで、IoT データの取得に要する遅延が削減されることが示されている。これらの従来研究 [10, 13] とは異なり、本稿で提案するキーワード型 ICDTN におけるコンテンツ配送は、要求メッセージを受信したノードがコンテンツを返送するかどうか大きく依存する。このため、キーワード型 ICDTN では、要求メッセージおよび応答メッセージに含まれるキーワードを基に、コンテンツを返送するかどうかの基準を適切に設計する必要がある。

3 情報指向遅延耐性ネットワーク

本節では、本稿で提案するキーワード型 ICDTN の基礎となる、ICDTN のネットワークモデル [8] を紹介する。ICDTN は、ICN における要求-応答型の通信モデルを採用しており、要求者が生成した要求メッセージがネットワーク中を転送され、対応するコンテンツが応答メッセージとして要求者に返送される。要求メッセージおよび応答メッセージの配送には DTN における蓄積・運搬・中継型の通信を用いる。

移動モデルに従ってフィールド上を移動するノード間の接触関係を、時間と共に変化する動的な有向グラフ $G(t) = (V(t), E(t))$ として表現する。時刻 t におけるノード v の隣接ノード (接触ノード) の集合を $\mathcal{N}_v(t)$ と表記する。

ノードは、要求メッセージと応答メッセージを管理する有限のバッファを有する。ただし、応答メッセージと比較して、要求メッセージの大きさは十分に小さいものと仮定し、バッファを浪費しないものとする。要求メッセージおよび応答メッセージには TTL (Time-To-Live) が付与されており、TTL が経過した要求/応答メッセージはバッファから取り除かれる。さらに、バッファが応答メッセージによって完全に占有されている状態

で、ノードが新たな応答メッセージをバッファに挿入する場合には、バッファ置き換えアルゴリズムに従ってバッファに存在する応答メッセージを取り除く。

ノード v が他のノード $u \in \mathcal{N}_v(t)$ と接触した時に、メッセージ中継方式に従って、これらのノードは要求メッセージと応答メッセージを互いに転送する。例えば、要求メッセージおよび応答メッセージのルーティング方式が典型的なエピデミックルーティングである場合には、ノード v は接触ノード u にノード u が保有していないメッセージの複製を転送する。一方、ノード v は、接触ノード u からメッセージを受信した時に、受信したメッセージの種類に応じて以下の動作を行う。

- 要求メッセージの場合

ノード v が要求メッセージを受信した場合には、まず、ノードは、受信した要求メッセージに対応する応答メッセージを保有しているかどうかを確認する。ICDTN では、要求メッセージと応答メッセージに含まれるコンテンツ識別子を基に、応答メッセージが要求メッセージに対応しているかどうかを照合する。対応する応答メッセージを保有している場合には、その複製を接触ノード u に返送する。一方、応答メッセージを保有していない場合には、要求メッセージの中継を継続するために、ノードは要求メッセージを自身のバッファに追加する。

- 応答メッセージの場合

ノード v が応答メッセージを受信した場合には、受信した応答メッセージを自身のバッファに追加する。応答メッセージに対応する要求メッセージを保有している場合 (つまり、要求メッセージと応答メッセージにおけるコンテンツ識別子が一致する場合) には、その要求メッセージを自身のバッファから取り除く。

4 キーワード型情報指向遅延耐性ネットワーク

本節では、本稿で提案するキーワード型 ICDTN を説明し、さらに、キーワード型 ICDTN の応用例を紹介する。キーワード型 ICDTN は 3 節で述べた ICDTN [8] を基礎とするが、キーワード (コンテンツ記述子) によりコンテンツ要求を解決する点が本質的に異なる。

まず、キーワード型 ICDTN で用いる要求メッセージと応答メッセージのヘッダ構造を説明する。要求メッセージは、キーワード集合・TTL (オプション) から構成される。一方、応答メッセージは、キーワード集合・コンテンツ識別子・TTL (オプション) から構成される。応答メッセージにおけるコンテンツ識別子は、キーワード集合が同一であるがペイロードが異なるコンテンツを区別するために用いる。

要求メッセージと応答メッセージが対応しているかどうかは、それぞれのメッセージに含まれるキーワードを入力とした任意の二値関数により求めることができる。例えば、文献 [10] では、応答メッセージのキーワード集合 C が要求メッセージ

のキーワード集合 $\mathcal{R}$ の部分集合である場合 ($\mathcal{R} \subseteq \mathcal{C}$) に、要求メッセージと応答メッセージが対応するとみなしている。一方、文献 [13] では、前述した関係と逆の場合 ($\mathcal{C} \subseteq \mathcal{R}$) に、要求メッセージと応答メッセージが対応するとみなしている。本稿では、後述する 5 節において、いくつかの二値関数を用いた時のキーワード型 ICDTN の特性を分析する。

次に、キーワード型 ICDTN において、ノードが要求メッセージおよび応答メッセージを受信した時の動作を説明する。ノードが要求メッセージを受信した時の動作は ICDTN と同様である。ノードが保有している応答メッセージの中から、受信した要求メッセージと対応する応答メッセージを接触ノードに返送する。ただし、ノードは応答メッセージを受信した時には、ICDTN とは異なり、受信した応答メッセージと対応する要求メッセージを削除するかどうかを適切に決定する必要がある。本稿では、要求メッセージと応答メッセージのキーワード集合が完全に一致した場合にのみ、要求メッセージをノードのバッファから削除するという単純な手法を採用した。ただし、実際には、応答メッセージと要求メッセージの一致度に依拠して、要求メッセージをバッファから適切に削除することで、過剰な応答メッセージの返送を回避するのが望ましい。

最後に、キーワード型 ICDTN の応用例として、災害時における避難情報・安否情報の取得を説明する。キーワード型 ICDTN により、災害時において、避難者がキーワードを基に情報 (例: 避難地図の画像) を検索し、発見された情報を取得することができる。ICDTN は災害時のための通信方式の一つとして検討されているが、災害時において、コンテンツ要求に必要なコンテンツ識別子を利用者が正確に取得することは容易ではない [14]。コンテンツ識別子に対して、少数のキーワードを利用者は事前に知っている可能性が高いため、キーワードを利用したコンテンツ取得は十分に可能である。例えば、キーワード型 ICDTN を利用することにより、避難者が避難地図の画像を取得する状況を考える。まず、配信者は避難地図の画像と $\{\text{location, evacuation map, image}\}$ というキーワードから構成されるコンテンツを生成する。避難者は、 $\{\text{evacuation map, image}\}$ というキーワードを埋め込んだコンテンツ要求を送出することで、ネットワーク中のいずれかのノードからキーワードに対応する (複数の) 避難地図の画像を取得することができる。

5 シミュレーション

本節では、シミュレーションにより、キーワード型 ICDTN の基本的な特性を調査する。

5.1 手法

1,000 × 1,000 [m] のフィールド上に、ポロノイダイアグラムによる経路制約をランダムに生成し、 N 台のノードをランダムに配置した。ノードは、制約付きランダムウェイポイント (CRWP: Constrained Random WayPoint) 移動モデル [15] に従って移動する。CRWP 移動モデルは、平面上の移動モデルであるランダムウェイポイント (RWP: Random WayPoint) 移動モデルに経路制約を考慮した移動モデルである。CRWP 移動モデルに従うノードは以下の動作を繰り返す; (1) 移動先となるグラフ上の目的頂点をランダムに選択する; (2) 選択された目的頂点に最短経路を通過して移動する。ここで、グラフは、ポロノイダイアグラムによる経路制約に相当する。各ノードの移動速度およ

び停止時間を 2–4 [km/h] の一様分布および 0–300 [s] の一様分布でそれぞれランダムに与えた。全てのノードの無線通信範囲を等しく 50 [m] とした。

DTN と同様に、ノードにおけるバッファの大きさは ICDTN の通信性能に影響を与える主要な要因の一つであるため、ノードにおけるバッファの大きさを 5–15 [message] で変化させた。また、ノードのバッファ置き換えアルゴリズムは FIFO (First-In First Out) を用いた。

10 種類のキーワードから構成されるキーワード集合 $\mathcal{K}$ を用意し、これらのキーワードをランダムに含むオリジナルコンテンツ (応答メッセージ) およびコンテンツ要求 (要求メッセージ) を生成した。キーワード集合 $\mathcal{K}$ からランダムに選択された 5 個のキーワードを含む 50 種類のオリジナルコンテンツを生成し、各ノードに均等に割り当てた。オリジナルコンテンツは、コンテンツの複製とは異なり、ネットワーク中から消失しないことに注意されたい。ノードは、要求メッセージの生成レート γ に従って、キーワード集合 $\mathcal{K}$ からランダムに選択した 1–5 個のキーワードを含む要求メッセージを生成することにより、コンテンツを繰り返し要求する。本シミュレーションでは、要求メッセージの生成レート γ を 0.001 [message/s] とした。また、生成される要求メッセージの TTL は 4 [h] とし、応答メッセージの TTL は十分に大きいものとした。

要求メッセージおよび応答メッセージのルーティング方式には、エビデミックルーティングを用いた。ノードが他のノードと接触した時には、まず、それぞれのノードが保有しているメッセージのリストを交換することにより、接触したノードが保有していないメッセージを確認する。その後、ノードは、当該要求メッセージと応答メッセージの複製を接触ノードに転送する。これまで、DTN や ICDTN のための様々なメッセージルーティング方式が提案されているが、本稿では、キーワードを利用したコンテンツ配送の特性に着目するため、メッセージルーティング方式には典型的なエビデミックルーティングを用いた。

キーワード型 ICDTN において、ノードが要求メッセージを受信した時に、その要求メッセージが自身が保有する応答メッセージと対応するかどうかを照合する方式には以下の 2 通りの方式を用いた。

- 類似度に基づく一致法

要求メッセージと応答メッセージにおけるキーワード間の類似度が閾値 τ 以上である場合に、応答メッセージが要求メッセージに対応するとみなす方法である。メッセージ間の類似度は任意の方法によって求められるが、本稿では、集合間の類似度を計算する典型的な指標であるジャカル指数を用いて、メッセージ間の類似度を $|\mathcal{R} \cap \mathcal{C}| / |\mathcal{R} \cup \mathcal{C}|$ として計算した。ここで、 $\mathcal{R}$ および $\mathcal{C}$ は要求メッセージおよび応答メッセージに含まれるキーワード集合である。

- 部分一致法 [13]

要求メッセージに含まれる全てのキーワードが応答メッセージのキーワード集合に含まれる場合 ($\mathcal{R} \subseteq \mathcal{C}$) に、応答メッセージが要求メッセージ対応するとみなす方法である。

性能指標として、類似度が s ($0 \leq s \leq 1$) 以上であるコンテンツの平均配送遅延 (ノードが要求メッセージを生成してから、当該メッセージと類似度が s 以上である応答メッセージを取得するまでに要した時間) を計測した。メッセージ間の類似度 s は、要求メッセージに含まれるキーワードと応答メッセージに

含まれるキーワードから上述したジャカル指数によって求めた。以降では、類似度が s 以上であるコンテンツの配送遅延を、単に s -コンテンツ配送遅延と表記する。例えば、0.2-コンテンツ配送遅延は、ある要求に対して、類似度が 0.2 以上であるコンテンツを受信するまでに要した時間を表す。

シミュレーションには、DTNSIM (DTN Simulator)^(注1) を基に開発した ICDTNSIM (ICDTN Simulator) を利用した。シミュレーションにおけるスロット長を 1 [s/slot] とし、24 [h] のシミュレーションを行った。与えられた条件下で、同一条件の実験を 20 回繰り返した時の、 s -コンテンツ配送遅延の平均と 95% 信頼区間をそれぞれ求めた。

特に断りのない限り、シミュレーションには以下のパラメータを用いた; ノード数 $N = 25$, バッファの大きさ $B = 5$ [message], 要求メッセージの生成レート $\gamma = 0.001$ [message/s]。

5.2 結果

平均 s -コンテンツ配送遅延を詳細に分析する前に、まず、平均 s -コンテンツ配送率 (ある要求メッセージに対して類似度が s 以上である応答メッセージの受信数 / 要求メッセージの生成数) を確認する。図 1 に、閾値 τ を変化させた時の類似度に基づく一致法と部分一致法を用いた場合の平均 s -コンテンツ配送率を示す。この結果から、類似度 s が低い ($s \leq 0.4$) コンテンツの配送率は高い一方で、類似度 s が高い ($s \geq 0.9$) コンテンツの配送率はかなり低いことがわかる。また、 $\tau = 1.0$ を用いた場合の類似度に基づく一致法を除いて、一致法に依らず、平均 s -コンテンツ配送率にほぼ差はないことがわかる。

以下では、ノードにおけるバッファの大きさ B を変化させた時の平均 s -コンテンツ配送遅延を調査する。まず、図 2 に、ノード数 N が 25 である場合の平均 s -コンテンツ配送遅延 (ある要求メッセージを生成してから、類似度が s 以上である応答メッセージを取得するまでの時間) を示す。これらの結果から、まず、類似度に基づく一致法 ($\tau = 1.0$) の場合を除いて、類似度 s の増加に対して、平均 s -コンテンツ配送遅延は増加することがわかる。類似度 s が低い場合には、オリジナルコンテンツを保有するノードだけでなく、ネットワーク中のノードが対応するコンテンツを保有している可能性が高いため、類似度 s が低いコンテンツの配送遅延は小さくなる。一方、類似度 s が高い場合には、要求メッセージと応答メッセージにおけるキーワードが十分に一致するまでコンテンツが返送されないため、類似度 s が高いコンテンツの配送遅延が増大する。閾値 τ が 0.2–0.6 である時の類似度に基づく一致法では、平均 s コンテンツ配送遅延には大きな差はないことがわかる。閾値 τ が大きくなるにつれ、ネットワーク中を転送されるコンテンツ量は削減されることから、平均 s -コンテンツ配送遅延が増大することなく、閾値 τ を可能な限り大きく設定する方がネットワーク資源の観点では望ましい。

また、 $\tau = 1.0$ である時の類似度に基づく一致法を用いた場合には、他の場合と異なり、類似度 s に対して平均コンテンツ配送遅延が上に凸になっていることがわかる。閾値 $\tau = 1.0$ である場合には、ある要求メッセージに対して類似度が 1 であるコンテンツのみが返送されるため、類似度が 1 以外のコンテンツの配送には多大な時間を要する。しかし、類似度が 1 以外のコンテンツは返送されず、類似度が 1 であるコンテンツの中継

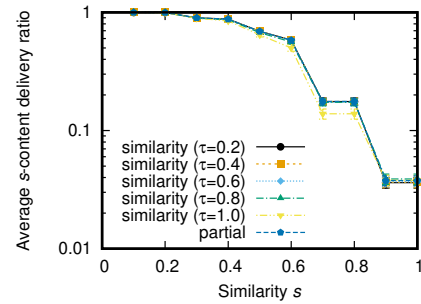


図 1 平均 s -コンテンツ配送率

にバッファを活用できるため、類似度が 1 であるコンテンツの配送遅延は削減される。ただし、本稿で定義する平均 s -コンテンツ配送遅延は、配送が正常に完了したコンテンツに対する遅延のみから計算されることに注意されたい (図 1 参照)。

次に、ノードにおけるコンテンツを保有するためのバッファの大きさが平均 s -コンテンツ配送遅延に与える影響を議論する。まず、バッファの大きさが増加することにより、当然ながら、類似度 s に依らず平均コンテンツ配送遅延が削減されていることがわかる。これは、メッセージ中継において応答メッセージが棄却される可能性が減少すると共に、メッセージの複製がネットワーク中に拡散されることで、コンテンツの取得に要する時間が削減されるためである。ただし、バッファの大きさが 10 [message] の場合 (図 2(b)) と 15 [message] の場合 (図 2(c)) を比較すると、バッファの大きさが増大したとしても、類似度が高いコンテンツに対する配送遅延はほとんど改善されないことがわかる。

最後に、ネットワークの規模 (ノード数) が増加した場合に、上述の傾向が維持されていることを確認する。図 3 に、ノード数 N が 50 である場合の平均 s -コンテンツ配送遅延を示す。図 2 と同様に、類似度に基づく一致法 (similarity) と部分一致法 (partial) を用いた場合の結果を示している。これらの結果より、ノード数が増加したとしても、ノード数が 25 の場合 (図 2) と同様の傾向が得られていることがわかる。特に、ノード数の増加に伴い、ノード間の接触頻度が増加するため平均 s -コンテンツ配送遅延が全体的に削減されている。ただし、図 3(a) より、 $\tau = 0.2$ や $\tau = 0.4$ の時の類似度に基づく一致法と部分一致法を比較すると、類似度に基づく一致法を用いた場合の平均 s -コンテンツ配送遅延が小さくなっていることもわかる。

6 まとめと今後の課題

本稿では、文献 [10] で提案されているコンテンツ記述子による名前付与法を ICDTN に応用することにより、キーワード型 ICDTN を提案した。キーワード型 ICDTN では、キーワード型 ICDTN では、要求メッセージおよび応答メッセージに含まれるキーワードを基に、コンテンツ要求を解決し、コンテンツ配送を実現する。さらに、いくつかのシミュレーションにより、キーワード型 ICDTN の基本的な特性を調査した。具体的には、ネットワークの規模やノードにおけるバッファの大きさを変化させながら、平均 s -コンテンツ配送遅延 (要求メッセージを生成してから、類似度が s 以上である応答メッセージを取得するまでに要した時間) を計測した。その結果、類似度 s が増加するにつれ、類似度が s 以上であるコンテンツを取得するまでに要する時間が増大することなどを示した。ただし、本稿におけ

(注1): <https://github.com/h-ohsaki/dtnsim> [accessed on October 1, 2020]

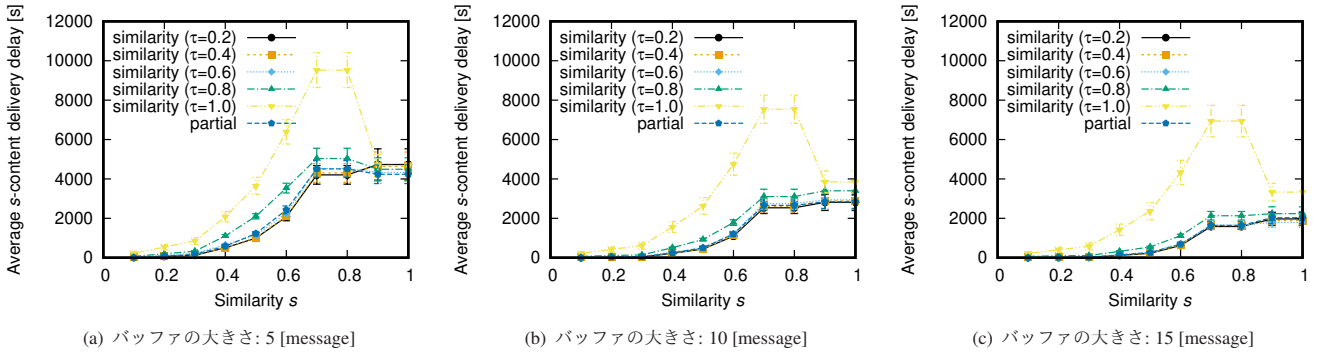


図2 ノード数 $N = 25$ の場合の平均 s -コンテンツ配送遅延

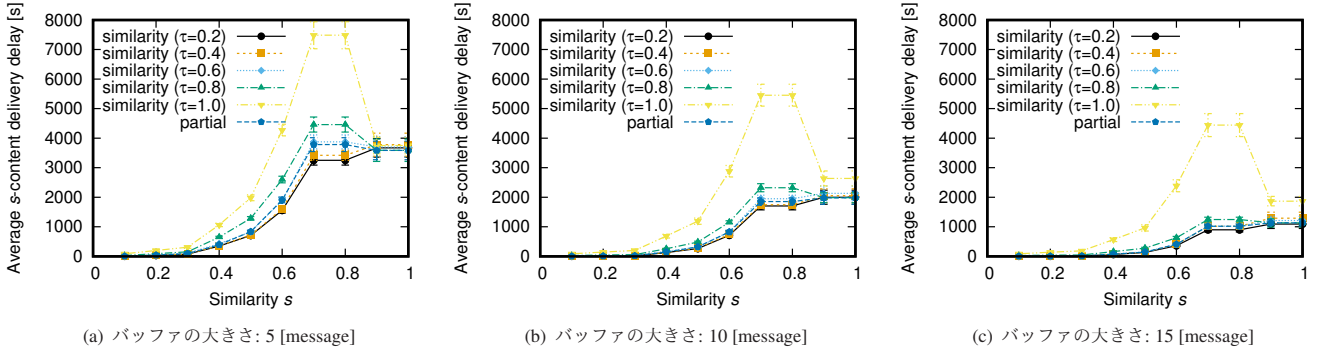


図3 ノード数 $N = 50$ の場合の平均 s -コンテンツ配送遅延

るシミュレーションはキーワード型 ICDTN の特性を調査するための初期検討となる実験であるため、シミュレーションには比較的単純な条件 (例: エピデミックルーティング) を用いた。このため、キーワード型 ICDTN の特性のさらなる分析は必要となる。

今後の課題として、より現実的な条件下でのキーワード型 ICDTN の有効性評価 (例: ネットワーク資源の浪費を考慮した評価) や、キーワード型 ICDTN を利用した災害時のためのコンテンツ配送方式の考案などが挙げられる。

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, no. 2, 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] C. Fang, H. Yao, Z. Wang, W. Wu, X. Jina, and F. R. Yu, “A survey of mobile information-centric networking: Research issues and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, pp. 2353–2371, Feb. 2018.
- [5] M. Amadeo, C. Campolo, and A. Molinaro, “Multi-source data retrieval in IoT via named data networking,” in *Proceedings of the 1st ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN 2014)*, pp. 67–76, Sept. 2014.
- [6] M. Meisel, V. Pappas, and L. Zhang, “Ad hoc networking via named data,” in *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture (MobiArch 2010)*, pp. 3–8, Sept. 2010.
- [7] M. Tsuru, M. Uchida, T. Takine, A. Nagata, T. Matsuda, H. Miwa, and S. Yamamura, “Delay tolerant networking technology—the latest trends and prospects,” *IEICE Communications Society Magazine*, vol. 16, pp. 57–68, Mar. 2011.
- [8] G. Tyson, J. Bigham, and E. Bodanese, “Towards an information-centric delay-tolerant network,” in *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Emerging Design Choices in Name-Oriented Networking (NOMEN 2013)*, pp. 387–392, Dec. 2013.
- [9] S. CC, V. Raychoudhury, G. Marfia, and A. Singla, “A survey of routing and data dissemination in Delay Tolerant Networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 67, pp. 128–146, May 2016.
- [10] M. Papalini, *TagNet: A Scalable Tag-Based Information-Centric Network*. PhD thesis, Faculty of Informatics of the Università della Svizzera Italiana, Oct. 2015.
- [11] H. M. A. Islam, D. Chatzopoulos, D. Lagutin, P. Hui, and A. Ylä-Jääski, “Boosting the performance of content centric networking using delay tolerant networking mechanisms,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23858–23870, Nov. 2018.
- [12] J. Yang, Y. Sun, and J. R. Carrion, “Modelling the delay distribution of information centric delay tolerant networks in disaster area,” in *Proceedings of the 7th ACM Workshop on Mobile Health*, pp. 1–6, July 2017.
- [13] O. Ascigil, S. Réné, G. Xylomenos, I. Psaras, and G. Pavlou, “A keyword-based ICN-IoT platform,” in *Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN 2017)*, pp. 22–28, Sept. 2017.
- [14] G. Tyson, E. Bodanese, J. Bigham, and A. Mauthe, “Beyond content delivery: Can ICNs help emergency scenarios?,” *IEEE Network*, vol. 28, pp. 44–49, Dec. 2014.
- [15] H. Ohsaki, Y. Yamada, D. Perrin, and M. Imase, “Impact of mobility constraints on epidemic broadcast mechanisms in delay-tolerant networks,” in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Complex Information Flows (CIF 2012)*, pp. 1131–1136, Mar. 2012.