

ユーザ近傍から多くのコンテンツを配信する 重複の少ないNDNのキャッシュアルゴリズム

中田 有哉¹ 重安 哲也^{2,a)}

受付日 2020年5月14日, 採録日 2020年11月5日

概要: NDNは過去に配信したコンテンツをネットワーク中にキャッシュすることで, 同一コンテンツの次回以降の配信時間を短縮する. ネットワークにキャッシュが十分に蓄積されていない場合には, 一定数の人気コンテンツを先行配信する手法を導入すれば同様の効果が得られることも報告されている. しかし, その場合に配信時間の短縮が期待できるのは先行配信コンテンツを要求した場合に限られるなど, 限定的である. 本論文は, 先行配信ノードよりも下流のルータが互いに協調し, 重複なくより多くの種類のコンテンツをユーザ近傍にキャッシュすることでより広範囲のコンテンツの配信時間も短縮する手法としてEDCを提案する. また, 提案手法によりネットワークキャッシュの多様性が向上すること, ならびに, 所定範囲内のノードからより多くのコンテンツをユーザに配信できることを明らかにする.

キーワード: コンテンツ指向型ネットワーク, NDN, キャッシュの多様性

A New NDN Cache Algorithm to Deliver Contents from Neighbor Node of Users with Less Duplication

YUYA NAKATA¹ TETSUYA SHIGEYASU^{2,a)}

Received: May 14, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: NDN realizes short content delivery by caching once transferred contents. It has been reported that short content delivery can be made by advance content delivery before the actual content requests even if the enough amount of content are not cached in network. The effects of advance content delivery, however, are limitedly given if and only if the users send request the advance delivered contents. This paper proposes new caching strategy, EDC which improves diversity of cached contents while avoiding cache overlapping among content routing in a distributed coordination manner. In addition, this paper clarifies that EDC effectively improves the number of contents delivered from nodes within prescribed area.

Keywords: content-oriented network, NDN, diversity of cached contents

1. はじめに

同一内容の情報が複数のユーザによって繰り返し参照されるネットワークでは, IP アドレスのように場所と結び付いた識別子ではなく情報の中身(コンテンツ)と結び付いた

識別子を用いることが有効であるとして, コンテンツ指向型ネットワーク(CCN: Content Centric Networking) [1], [2]の概念が広く注目を集めている.

CCNの概念をアーキテクチャに実装したものにNDN(Named Data Networking) [3], [4]がある. NDNは過去に配信したコンテンツをネットワークにキャッシュすることで, 次回以降の同一コンテンツの要求時にServerからよりも短い時間でコンテンツをユーザに配信する. しかし, ネットワークに十分なキャッシュが蓄積されていない段階では, コンテンツ配信時間の短縮効果は得られない.

そこで, 文献 [5] ではユーザに所定の範囲内からコンテ

¹ 県立広島大学大学院総合学術研究科
Graduate School of Comprehensive Scientific Research,
Prefectural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558,
Japan

² 県立広島大学経営情報学部経営情報学科
Department of Management Information Systems, Prefec-
tural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558, Japan

a) sigeyasu@pu-hiroshima.ac.jp

コンテンツを配信できる場所のノードを先行配信ノード（ADN：Advance Delivered Node）に選定し、同ノードに人気コンテンツをあらかじめ配信することにより、ユーザへのコンテンツ配信時間に高い短縮効果が得られることを報告している。

しかしながら、同手法の効果は、先行配信したコンテンツに対する要求が生じた場合に限られる。先行配信コンテンツ数を増やせば同手法の効果も高くなるが、先行配信数の増加は、単純に先行配信時のネットワーク負荷を高くする。また、追加で配信することになるコンテンツの多くは当然、追加する前から配信することが決まっていたコンテンツより人気のないコンテンツとなるため、先行配信実施時の効率は確実に低下する。そのため、先行配信の効率を低下させずに、所定時間以内にユーザにコンテンツを多く配信するには、ユーザ近傍のノードのキャッシュを効果的に活用する必要がある。

以上をふまえ、本論文はユーザに所定時間内にコンテンツを配信できる場所に設置する先行配信ノードより下流のノード群が連携して自律分散的に重複なくコンテンツをキャッシュすることで、多様性を向上させる EDC (Eliminate Duplicated Cache) を提案する。ここで、所定時間とはアプリケーションによって要求条件は異なるが、たとえば動画配信では再生を途切れさせない時間、つまり、先行して取得したピースの再生が終了するまでの時間となる。

以降、本論文を次のように構成する。まず、2章でNDNの動作概要と我々が文献 [5] で提案したコンテンツの先行配信について述べる。3章は新たなキャッシュアルゴリズム EDC を提案するとともに4章で同手法の有効性を評価する。5章はまとめであり本論文の議論を総括する。

2. 関連研究

2.1 NDN

NDN はネットワーク中の相手ノードの位置を示す IP アドレスではなく、コンテンツの中身を表す名前を識別子に記載した Interest と Data の 2 種類のパケットでコンテンツの発見と配送を行う。また、ネットワーク上を転送されるコンテンツをキャッシュできるルータとして CR (Content Router) を導入する。

以下では NDN の動作概要を図 1 を用いて説明する。

Interest 転送によるコンテンツ発見 (図 1 (1))

ユーザはコンテンツ名を記載した Interest でコンテンツを要求する。ここで、UserA と UserB がともに “/host0/0” を要求することを考える。両者の Interest が最初に到達する CR1 は後のコンテンツ返送のために到着元 face 番号 0, 1 とコンテンツ名 “/host0/0” を PIT (Pending Interest Table) に登録する。先に CR1 に到達した UserA の Interest は FIB (Forwarding Information Base) に従って

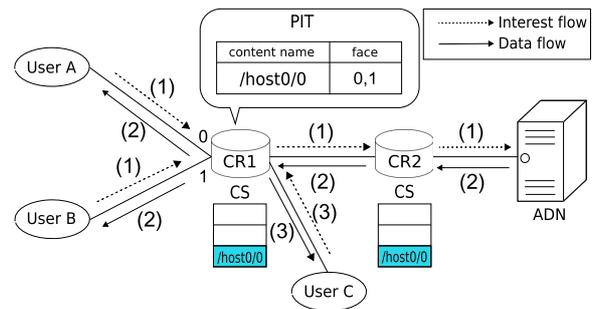


図 1 NDN の動作概要

Fig. 1 Overview of NDN procedure.

Server 方向の上流 CR に転送される。一方、後に到達した UserB の Interest は PIT に到着元 face 番号を追加するのみで上流 CR には転送されない。

Data 転送によるコンテンツ配送 (図 1 (2))

コンテンツを保持する Server に Interest が到達すると、Server は “/host0/0” に対応するコンテンツを Data として到着元 face に返送する。返送された Data を受信した CR はその複製を CS (Content Store) にキャッシュするとともに、同じく自身の PIT に記載された face に Data を返送する。このとき転送時に参照された PIT の該当エントリを削除する。

CR のキャッシュからのコンテンツ返送 (図 1 (3))

Interest を受信した任意の CR は自身の CS に対応するキャッシュが存在すれば、Server の代理でコンテンツを返送する。そのため NDN では、CR がユーザからの要求頻度が高いコンテンツをキャッシュしていれば多くの要求に対して短時間でユーザにコンテンツを配送できる。

2.2 コンテンツの先行配信

NDN は要求されたコンテンツのキャッシュが CR に存在しなければ、コンテンツ配信時間は短縮できない。そこで、我々は文献 [5] において、ネットワーク稼働初期でもユーザに CR からコンテンツを短時間で配信できる人気コンテンツの先行配信を提案した。同手法では、ユーザからアクセスが容易であり、かつ、所定時間内にユーザにコンテンツを提供できる位置の CR にコンテンツを先行して配信する。

これにより、ユーザは実際の Interest/Data 制御によって CR に十分なコンテンツがキャッシュされていない場合でも、既存の NDN に比べてより多くのコンテンツを所望時間以内に取得できる。

3. CR 間協調によるコンテンツキャッシュ手法

文献 [5] で提案された手法を用いれば、先行配信したコンテンツの取得要求に対しては短時間で配信可能になる。先行配信するコンテンツ数を増やせば、所定時間内にユーザに配信できるコンテンツの割合も単純に増加するが、先

行配信数の増加は、先行配信時のネットワーク負荷を増加させる。また、同時に、人気度の低いコンテンツも先行配信することになり、先行配信コンテンツ全体の平均ヒット率と効率を低下させる。

そこで、以下では、先行配信の効率を低下させずに、所定時間内にユーザに配信可能なコンテンツの割合を増加させるため、先行配信ノードより下流のCRが互いに自律分散的に協調することで、連携するCR群 (CCG: Cooperative Cache Group) 内で重複が少なく多様性の高いキャッシュを実現する手法としてEDCを提案する。

3.1 EDCによる重複のないコンテンツキャッシュ

文献 [5] で提案する手法は、所定時間内にユーザにコンテンツを配信できるノードにコンテンツを先行配信する。そのため、同ノードよりも下流のCRのキャッシュを有効活用すれば、より多くのコンテンツを所定時間内にユーザに配信できることになる。しかし、NDNでは、転送されるコンテンツを経路となったすべてのCRに蓄積するLCE (Leave Copy Everywhere) [6] が一般的に使用される。

所定時間内にユーザにコンテンツを配信するには、先行配信ノードはServerよりもユーザ近傍のものが選定されるが、同ノードより下流は当然限られた段数のCRとなる。そのため、LCEでは多くのキャッシュが重複することで、多様性が低く効率の悪いキャッシュ管理となる。そこで、以下では限られた段数のCRであっても多様性の高いコンテンツキャッシュを実現する手法を述べる。

3.1.1 EDCを実装したNDNのInterest/Data制御

EDCの動作を図2を用いて説明する。EDCを実装するNDNでは、PITエントリに新たにCacheフラグを追加する。Cacheフラグはbool型であり、これがTrueの場合のみ、CRは返送されてきた該当コンテンツを自身のバッファにキャッシュする。

図2に示すように、EDCで連携するCCGをCR1, 2で構成する。ここで、任意のコンテンツに対するInterestがCCG上で転送された際に同Interestに対応するPITエントリのCacheフラグがTrueになるのをただ1つのCRに限定すれば、CCG上での重複キャッシュは回避できる。これを実現するため、Interestにも新たにbool型のreserve

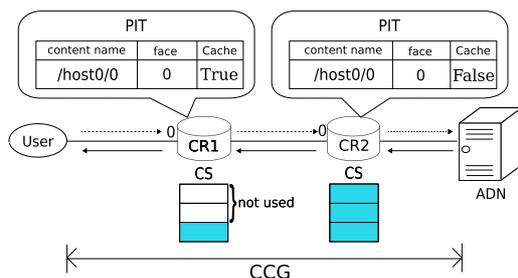


図2 EDCのInterest/Data制御
Fig. 2 Interest/Data exchange by EDC.

フラグを追加する。

コンテンツを要求するユーザはreserveフラグをFalseにしたInterestを隣接するCRに送信する。Interestを受信したCRは、自身に対応するコンテンツをキャッシュしていなければ、新たにPITエントリを作成する。このとき、受信したInterestのreserveフラグがTrueであれば作成するPITエントリのCacheフラグをFalseにする。そうでなければ、次式に従ってCacheフラグの値を決定する。

$$\begin{cases} \text{True} & (\text{CS残量} > \text{CacheフラグがTrueのエントリ数}) \\ \text{False} & (\text{CS残量} < \text{CacheフラグがTrueのエントリ数}) \end{cases}$$

さて、PITエントリを作成したCRは、InterestをFIBに従って上流CRに転送するが、その際、CacheフラグをTrueにした場合は、あわせてInterestのreserveフラグもTrueにして転送する。

なお、Cacheフラグとreserveフラグを用いた制御はCCG内のみで行うこととする。CCGや先行配信ノード以外、すなわち、ネットワーク上流のCRでは既存のNDNと同様にLCEを適用する*1。

3.1.2 CCG内のキャッシュリフレッシュ制御

EDCでは、前述したInterest/Data制御によって重複のないコンテンツキャッシュをCCG内で実現する。この制御はネットワーク中の複数のCCGが互いに素である場合は有効に機能するが、少なくとも2つ以上のCCGがその一部のCRを共有する場合には、いずれかのCCG内でキャッシュの重複が発生する可能性がある。

ここで、CCGを構成するCR数が2である2つのCCG (CCG_A, CCG_B) を考える (図3参照)。同図に示すように2つのCCGはCR₂を共有する。どちらのCCGも、EDCの制御で述べたようにユーザ近傍のCR (CR₁, CR₃) から順にコンテンツをキャッシュするが、それらのCS残量がなくなればCR₂を使用する。

さて、2つのCCG間にユーザ数あるいはコンテンツ要

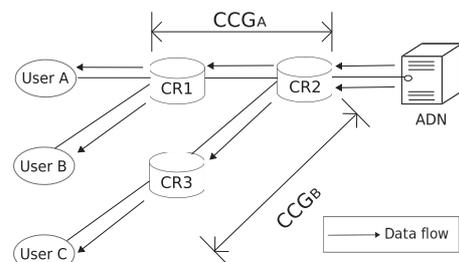


図3 複数CCG間での一部CRの共有
Fig. 3 Overlapping of CR on multiple CCGs.

*1 CCGや先行配信ノード以外にEDCを適用しないのは、後述するリフレッシュ制御をネットワーク全体に実施することのオーバーヘッドが大きくなるためである。

求数にばらつきが存在すれば、当然、CCG中のCRのバッファ使用量にも差が生じることになる。そのような場合、下流CRのバッファ残量がなくなった方のCCGが先に上流のCR₂のバッファを使用することになるが、他方のCCGでは、引き続き下流のCRにキャッシュをするため、下流と上流のCRで同じコンテンツをキャッシュする状況が発生する。

このような状況が発生すれば、CCG内のキャッシュの多様性向上を妨げることになるため、改善が必要である。そこで、提案するEDCでは、一定時間ごとにCCG内のキャッシュの重複を検知し、自律分散的にこれを排除するリフレッシュ制御を実装する。

リフレッシュ制御は、先行配信ノードを起点として実施する。同ノードは、一定の時間間隔が経過するたびに通常動作で返送するDataにInvestigationリストを付与する。Investigationリストとは、コンテンツ名を記載するリストであり、同リストが付与されたDataを受信したCRは、自身のCSにキャッシュするすべてのコンテンツの名前を追記した後に、さらに下流のCRに転送する。ここで、コンテンツ名追記の際に、自身が保持するコンテンツと同じ名前がすでに記載されていれば、重複キャッシュと判断して、自身のCSから該当コンテンツを削除する。

結果として、同一CCG内に重複キャッシュが存在する場合には、より、CCG内の上位のCRにのみ1つだけキャッシュを残すことで、複数CCGが集約されるような一般的なネットワークにおいて、キャッシュの利用効率と多様性向上を実現する。

3.1.3 キャッシュ入れ替え制御 CCG_{rep}

CCGを構成するすべてのCRのバッファがキャッシュによって埋まると新たなコンテンツをキャッシュできなくなる(図4参照)。そこで、EDCでは、そのような場合にも新たに返送されたコンテンツをCCG内でキャッシュするために次に述べる手続き(CCG_{rep})で破棄対象とするキャッシュを選択する。なお、この手順のためにInterestには新たに初期値がNULLのoldestフィールドを追加する。

CS残量がない場合にreserveフラグがFalseのInterestを受信したCRは、要求されたコンテンツのキャッシュを自身が保持していなければ、Interestのoldestフィールド

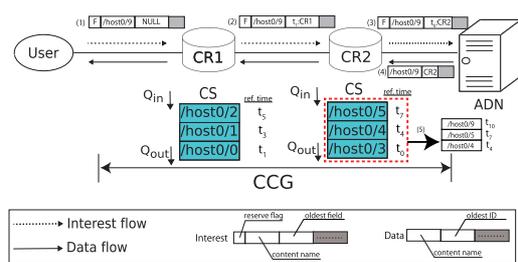


図4 CCG_{rep}の概要
Fig. 4 Overview of CCG_{rep}.

に記載された時刻と最も古い自身のキャッシュの参照時刻ORTを比較する。そのとき、ORTの方が古い、もしくはoldestフィールドがNULLのいずれかであれば、oldestフィールドをORTの時刻と自身のIDで上書きする。

その後、CCGよりも上流のノードにおいてInterestに対するコンテンツが返送される場合、InterestのreserveフラグがFalseであれば、oldestフィールドに記載されたIDを返送するコンテンツにも転記する。その後は、これまでに述べた手順に従ってコンテンツが返送されることになるが、コンテンツに転記されたIDと同じIDのCRがこれを受信した際は、最も参照時刻の古いコンテンツのキャッシュを破棄することで新たに受信したコンテンツをキャッシュする。

ところで、任意のInterestに対するCCG_{rep}の一連の手続きが完了する前にその他のInterestが到着により新たなCCG_{rep}手続きが開始されると、返送される複数のコンテンツを1つのCR上でキャッシュするという誤った制御が行われる可能性がある。そこで、任意のInterestのoldestフィールドに自身の情報を記録したCRは、実際に自身がキャッシュするかどうかとはは無関係に、対応するコンテンツが返送されてくるまでは、新たにInterestが到着してもoldestフィールドには記録を行わない。結果として、CCG中のすべてのCRが値を記録せずoldestフィールドとreserveフラグが、それぞれNULL, FalseのInterestがコンテンツ保有ノードに到着する可能性があるが、その場合はランダムでCCG中のCRのIDを1つコンテンツに記載する。

3.1.4 キャッシュアルゴリズム

EDCは、個々のCR内のキャッシュ管理にLRU(Least Recently Used)もしくは、SLRU(Segmented LRU) [7]のいずれかを適用する。

LRU (図5(a))

LRUはバッファ内でヒットしたキャッシュを最上部に移動する。最も長い時間参照されていないコンテンツがキャッシュアウト対象となる。

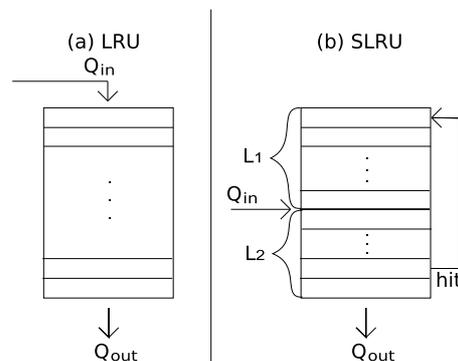


図5 LRU/SLRUによるキャッシュ管理
Fig. 5 Cache management on LRU/SLRU.

SLRU (図 5(b))

SLRU は人気コンテンツのキャッシュアウトを軽減するアルゴリズムであり、本来はディスクシステム用に提案されたものであるが、文献 [8] のように NDN に適用する研究もある。SLRU はバッファを L_1 と L_2 に分割し、新しいコンテンツが到着すれば L_2 に、Interest が自身のコンテンツにヒットした場合はそのコンテンツを L_1 の最上位に移動する。この制御により、人気コンテンツが L_1 に蓄積され、長期的な保持が可能になる。

4. 性能評価

本章では、提案手法の有効性を評価する。評価には C++ 言語を用いて開発した計算機シミュレータを使用する。

4.1 リフレッシュ制御の検証

本節では、EDC に実装したリフレッシュ制御によるキャッシュされたコンテンツの重複検知と削除が正しく機能することを確認する。図 6 にリフレッシュ制御の検証に用いたトポロジを示す。同図から分かるように、2つの CCG は CR1 を共有する。EDC のリフレッシュ制御では、CCG 内に複数の同一キャッシュが存在する場合、より下流に位置するキャッシュを削除するため、同図において重複が検出された場合は、CR2 あるいは CR3 のキャッシュが削除される。

ユーザ A, B にそれぞれ $/host0/k$ ($0 \leq k \leq 99$) のコンテンツ要求が発生した場合に両 CCG 内の重複キャッシュの平均数を計測した結果を表 1 に示す。同結果から、リフレッシュ制御の適用により、CCG 内の重複キャッシュが適切に削除されていることが確認できる。

4.2 評価環境

表 2 に評価に用いたシミュレーション諸元を示す。図 7 にシミュレーショントポロジを示す。同図のサーバを含む

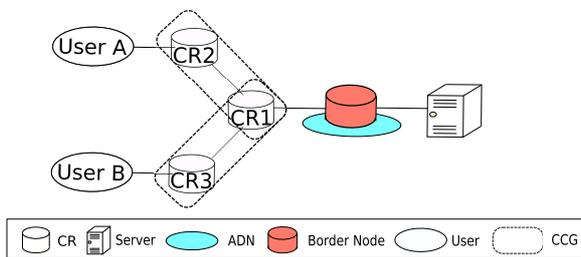


図 6 リフレッシュ制御の動作検証

Fig. 6 Verification of refresh control on EDC.

表 1 CCG 内の重複キャッシュ平均数

Table 1 Average number of duplicated cache on CCG.

リフレッシュあり	リフレッシュなし
0	2.8

ネットワークを NW1 に、先行配信ノードを含む下流ネットワークを NW2~4 とする。本評価では NW1 を ISP (Internet Services Provider) や AS (Autonomous System) の接続関係を模したネットワークにするため Barabasi Albert モデル [9] によって作成した。NW1 のノード数は 50 であり、サーバ以外のノードはすべて CR とした。NW2~4 は 1 つの組織を模したネットワークであり、それぞれ末端にユーザを 50 人配置する。先行配信ノードは多くのユーザが経由する位置にある Border ノードとする。

各ユーザは Zipf の法則 [10] に従いコンテンツを要求する。Zipf の法則は現実のユーザのコンテンツ要求を近似するためによく用いられる確率分布であり、本評価ではユーザはコンテンツ $/host0/k$ ($0 \leq k \leq 999$) を式 (1) に示す確率で要求する。

$$P_N(k) = \frac{\frac{1}{k^\alpha}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{n^\alpha}} \quad (1)$$

ここで、 α はこの確率分布の偏りを決定する変数であり、 α が大きいほど分布の偏りも大きくなる。本評価では、現実的な人気度の偏りを再現するため $\alpha = 0.7$ で性能を評価した [11]。

表 2 シミュレーション諸元

Table 2 Simulation parameters.

Parameter	Value
全ノード台数	377 [台]
Server	1 [台]
CR	76 [台]
User	300 [台]
コンテンツ総数	1,000
Interest 生成間隔	0.5 [sec]
Data Rate	1 [Gbps]
Interest Packet	100 [Byte]
Data Packet	1,000 [Byte]
回線遅延時間	1 [msec]
Simulation Time	100 [sec]
L_1 サイズ	10

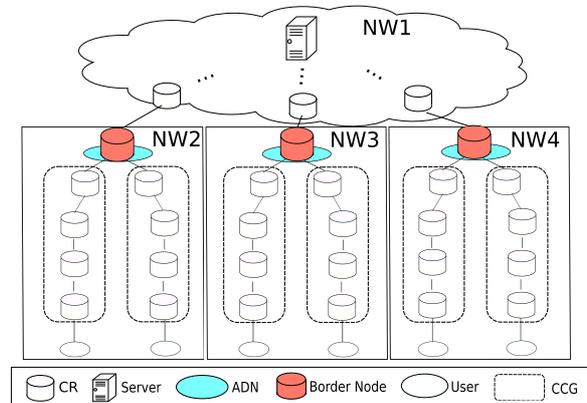


図 7 シミュレーショントポロジ

Fig. 7 Simulation topology.

本評価では先行配信ノードに人気度が上位 10 個のコンテンツをあらかじめ配信する。この先行配信コンテンツは後から到達したコンテンツと入れ換えない。また、EDC を適用するのは NW2, 3, 4 内の各 CCG とする。

4.3 先行配信効果の評価

本論文で提案する EDC の適用以前に、先行配信の有無がどの程度 Border ノード (ADN) 以下からのコンテンツ返送に影響するかを図 8 に示す。ここでは、先行配信実施の有無によらず、評価を行ったすべての手法のすべての CR は LRU を用いてコンテンツをキャッシュさせた。また、先行配信の効果を純粋に評価するために CR のキャッシュサイズを制限せずに評価した。なお、同図のキャッシュヒット率は直前 1 秒間に送信した Interest 数に対して Border ノード以下からコンテンツが返送された割合である。なお、シミュレーション経過時刻が 1 秒に満たない場合は、シミュレーション開始からその時刻までの値をプロットしている。

同図から、シミュレーション開始直後は先行配信による高い効果が確認できるものの、時間の経過とともに優位性は減少し、最終的に先行配信なしの場合との性能差がなくなることが分かる。これは、先行配信なしのネットワークでも、通常のコンテンツの配信によって Border ノード以下の CR にキャッシュが蓄積されたことが原因であると考えられる。なお、先行配信するコンテンツ数やコンテンツの要求頻度によっても変化するものの、既存の NDN に単純に先行配信を組み合わせた場合は、同様の傾向となると考えられる。

4.4 キャッシュサイズと Border ノード以下でのキャッシュヒット率の関係

次に、先行配信を行う場合に本論文で提案する EDC の適用の有無の影響について評価する。図 9 にキャッシュサイズを変化させた場合の Border ノード以下でのキャ

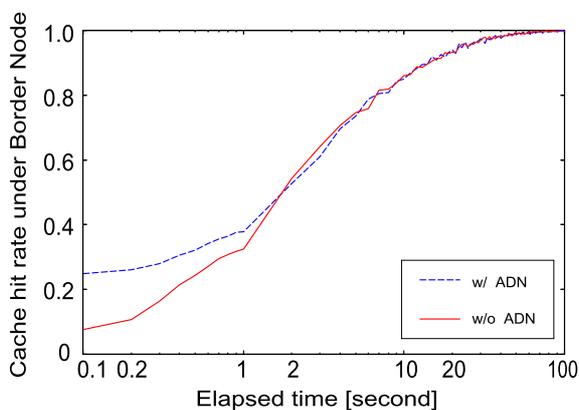


図 8 Border ノード以下でのキャッシュヒット率の推移
Fig. 8 Cache hit rate under border node.

ッシュヒット率を示す*2。同図の横軸と縦軸は、CR のキャッシュサイズと Border ノード以下でのキャッシュヒット率をそれぞれ示している。

同図から EDC の適用によって Border ノード以下のキャッシュヒット率が向上することが分かる。また、EDC を適用した手法は CR のキャッシュサイズが 200 になるまでキャッシュヒット率が向上する。その際、EDC 適用なしの手法よりも 24%高い値となることが確認できる。これは、EDC の適用により、CCG 内の CR にキャッシュされるコンテンツの多様性が向上したためであると考えられる。また、キャッシュサイズが小さい場合は、SLRU を適用した場合にキャッシュヒット率がわずかながら向上することも分かる。これは、少ないバッファでも人気の高いコンテンツのキャッシュを SLRU によってより長く保持できたためと考えられる。

4.5 キャッシュサイズとキャッシュヒット率の関係

図 10 にキャッシュサイズを変化させた場合のネットワーク全体のキャッシュヒット率を示す。同図から EDC を適用することで高いキャッシュヒット率を達成できることが分かる。また、EDC を適用した手法は CR のキャッシュサイズが 200 になるまでキャッシュヒット率が向上する。その際、EDC 適用なしの手法よりも 23%高い値となることが確認できる。これは、EDC により、CCG 内の CR のキャッシュから重複コンテンツが排除されることでキャッシュの多様性が向上したためであると考えられる。

また、バッファサイズが十分大きい場合は、EDC の適用の有無によらず、キャッシュヒット率はほぼ同等となることが分かる。これは、キャッシュサイズが十分大きい場合は中継したコンテンツの多くを 1 つの CR 内にキャッシュ

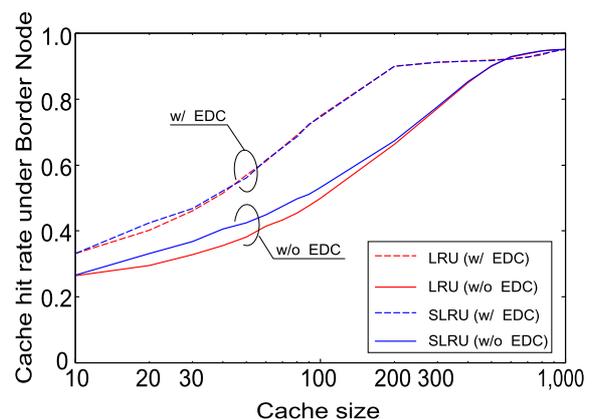


図 9 キャッシュサイズと Border ノード以下でのキャッシュヒット率の関係

Fig. 9 Relationship between cache size and cache hit rate under border node.

*2 本論文の評価はコンテンツ総数が 1,000 であるので、結果に示すキャッシュサイズ 1,000 の値は、すべてのコンテンツが CS に格納できる制限なしの場合と等しいことに注意されたい。

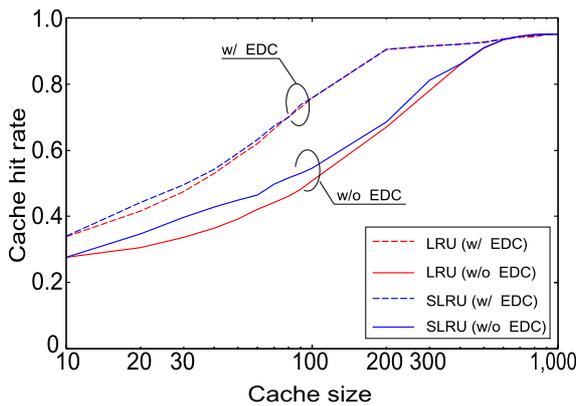


図 10 キャッシュサイズとネットワーク全体のキャッシュヒット率の関係

Fig. 10 Relationship between cache size and cache hit rate entire network.

できるため、CR 間での重複キャッシュを排除する必要性がなくなるためである。

5. おわりに

本論文では、複数ユーザが同一内容のコンテンツを参照するようなネットワークの利用形態において、ネットワークキャッシュを活用しトラフィック負荷を軽減しつつ、コンテンツ配信時間を短縮できる NDN の高度化について議論した。特に、従来の NDN ではネットワークに十分なコンテンツがキャッシュされていない場合でも配信時間の高い短縮効果を実現できるコンテンツの先行配信手法と組み合わせることで、所定の範囲内のノードからコンテンツをユーザに配信できるコンテンツ数を増加させるために、先行配信ノード以下のコンテンツキャッシュの重複を少なくするアルゴリズムとして EDC を提案した。

シミュレーション評価の結果、キャッシュコンテンツの多様化により、従来の手法よりも EDC は Border ノード以下の CR から返送するコンテンツ数の割合を増加できることを明らかにした。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP17K00132 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kim, J., Jang, M., Park, J., Choi, S. and Lee, B.: Enhanced forwarding engine for content-centric networking (CCN), *Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2013)*, pp.92-93 (2013).
- [2] Ahlgren, B., Dannewitz, C., Imbrenda, C., Kutscher, D. and Ohlman, B.: A survey of information-centric networking, *IEEE Communications Magazine*, Vol.50, pp.26-36 (2012).
- [3] Soniya, M. and Kumar, K.: A survey on named data networking, *Proc. 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS2015)*, pp.1515-1519 (2015).
- [4] Chen, Q., Xie, R., Yu, F., Liu, J., Huang, T. and Liu,

- Y.: Transport Control Strategies in Named Data Networking: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.18, pp.2052-2083 (2016).
- [5] Nakata, Y. and Shigeyasu, T.: A new contents migration method for reducing network traffic and improving cache hit rate on NDN, *Proc. 13th International Conference on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2018)*, pp.204-212 (2018).
- [6] Jacobson, V., Smetters, D., Thornton, J., Plass, M., Briggs, N. and Braynard, R.: Networking named content, *Proc. ACM CoNEXT 2009*, pp.1-12 (2009).
- [7] Karedla, R., Love, J. and Wherry, B.: Caching strategies to improve disk system performance, *Computer*, Vol.27, pp.38-46 (1994).
- [8] Kim, D., Bi, J., Vasilakos, A. and Yeom, I.: Security of Cached Content in NDN, *IEEE Trans. Information Forensics and Security*, Vol.12, pp.2933-2944 (2017).
- [9] Dorogovtsev, S., Mendes, J. and Samukhin, A.: Structure of growing networks with preferential linking, *Physical Review Letters*, Vol.85, pp.4633-4636 (2000).
- [10] Breslau, L., Cao, P., Fan, L., Phillips, G. and Shenker, S.: Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications, *Proc. IEEE INFOCOM 99*, pp.126-134 (1999).
- [11] Afanasyev, A., Moiseenko, I. and Zhang, L.: ndnSIM: NDN simulator for NS-3, Technical Report, NDN-0005 (2012).



中田 有哉 (学生会員)

令和元年 3 月 県立広島大学経営情報学部経営情報学科卒業。現在、同大学大学院総合学術研究科情報マネジメント専攻在学中。コンテンツ指向型ネットワークに関する研究に従事。



重安 哲也 (正会員)

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。現在、県立広島大学経営情報学部教授。同大学大学院情報マネジメント専攻長。主に、無線通信プロトコルに関する研究に従事。情報処理学会論文誌元主査。

IEEE, 電子情報通信学会各会員。本会シニア会員。