

# NDN の FIB サイズ低減のためのコンテンツ配置ノード数に関する考察

Investigating Node Count of Content Placement for Reducing FIB Size in NDN

橋本 紘輝

上山 憲昭

Hiroki Hashimoto

Noriaki Kamiyama

立命館大学 情報理工学部

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

## 1. はじめに

デジタルコンテンツや IoT データを効率的に配信する新しいネットワークとして、情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) が注目を集めている。ICN ではルータでコンテンツをキャッシュし、コンテンツの名称を用いて要求パケットを転送することで、通信開始時にコンテンツの配信元を特定せず、コンテンツを発見的にルータから配信する。しかし国や地域ごとに一定範囲が割り当てられる IP アドレス用いた従来の通信とは異なり、コンテンツの名称は場所に依存しないため、ICN ルータの転送テーブル (FIB: forwarding information base) のエントリ集約は困難である。名前が同一の文字列を含む場合は少数の FIB エントリに集約可能なため、エントリを効果的に集約するには、似たような名称のコンテンツが同一ノードに存在することが望ましい。ICN の中でも NDN (Named Data Networking) [5] が主流であり、本稿では NDN を想定する。

インターネットでは CDN (content delivery network) が、ユーザの配信品質を向上しネットワーク内のトラフィック量を削減する技術として広く用いられている [4]。しかし NDN では、特に高人気コンテンツは要求ユーザの近くのルータから配信される可能性が高く、CDN の目的は NDN によって満たされる。

そこで筆者らは、CDN を NDN のオリジナル提供プラットフォームとして位置づけ、URL の最初のコンポーネントである TLD (top level domain) と URL の 2 番目のコンポーネントである SLD (second level domain) の各々に対し、該当 Web オブジェクトの個数の降順に同一の CDN のキャッシュサーバに割り当て、Web オブジェクトを再配置することで、NDN ルータの FIB のサイズを効果的に削減することを提案した [1]。以降、本稿ではコンテンツとして Web オブジェクトを想定する。

また著者らは、高人気 Web オブジェクトを多く含むドメイン名の URL をネットワークの中心に配置することで、FIB サイズだけでなく平均リンク負荷の低減も同時に考慮するコンテンツ配置法を提案した [2]。しかしネットワークの設備コストを低減し、また障害発生時にもコンテンツ配信を継続するには、リンク負荷の偏りやコンテンツ可用性といった品質尺度も重要であるが、これらの研究では、リンク負荷の偏りやコンテンツ可用性は考慮していない。またこれらの研究ではネットワーク上のすべてのノードにコンテンツを配置することを想定しているが、配置ノードを少数に限定することで、さらなる FIB サイズや平均リンク負荷の低減が期待される。そこで本稿では、平均 FIB サイズ、平均リンク負荷、リンク負荷の変動係数、コンテンツ可用性の 4 つの尺度を同時に考慮した、コンテンツ配置ノードの設計法を提案する。そして複数種類のトポロジを用いた数値評価により、トポロジや尺度の評価重みが、最適な配置ノード数に与える影響を明らかにする。

## 2. コンテンツ配置方式

[1] では FIB 集約効果を高める為に TLD や SLD が同じオブジェクトを同一のノードに割り当て、ノードやリンクの負荷集中を避けるために各ノードに配置するオブジェクト数に上限値  $B$  を設けた。また [2] では要求比率が高いドメイン名を他のノードに至るホップ長の平均値が小さいノードに優先して割り当て、FIB サイズだけでなく平均リンク負荷を同時に低減するコンテンツ配置設計法を提案した。以下にその配置方式を説明する。

使用 URL の合計要求比率の降順で TLD をソートし、 $D_1(x)$  を  $x$  番目にランクされた TLD と定義する。同様に各 TLD に対し、合計要求比率の降順で SLD の組をソートし、 $D_2(s, y)$  を  $s$  で  $y$  番目にランクされた SLD と定義する。 $M_1$  を異なる TLD の数、 $M_2(s)$  を TLDs を有する異なる SLD の数と定義する。 $U_1(x)$  は TLD として  $D_1(x)$  を持つ URL の集合を示し、 $U_2(s, x)$  は TLD として  $s$  を、SLD として  $D_2(s, x)$  を有する URL の集合を示す。さらに  $m_1(x)$  と  $m_2(s, x)$  を、 $U_1(x)$

と  $U_2(s, x)$  に含まれる URL の数として、 $r_1(x)$  と  $r_2(s, x)$  を  $U_1(x)$  と  $U_2(s, x)$  に含まれる URL の要求比率の総和として定義する。

$A_n$  はノード  $n$  に配置できる URL の数を示す。ノード  $ij$  間の最短ホップ長を  $h_{ij}$ 、ノード  $n$  の人口比を  $r_n$  としたとき、 $\sum r_n h_{xn}$  によりノード  $x$  から他の全てのノードに至る平均ホップ長  $u_x$  が求められる。 $u_x$  が最小であるノードを  $n^*$  とする。

$r_1(x)$  の降順に、 $x$  を選択し、 $m_1(x) \leq A_{n^*}$  の場合にはノード  $n^*$  に  $U_1(x)$  を割り当て、 $m_1(x) > A_{n^*}$  の場合には  $U_1(x)$  を  $y = 1, 2, \dots, M_2(D_1(x))$  として  $U_2(D_1(x), y)$  に分割し、 $U_2(D_1(x), y)$  を  $r_2(D_1(x), y)$  の降順にノード  $n^*$  へ割り当てる。割り当て中に  $A_{n^*}$  が上限値  $B$  を超える時、再計算を行い、 $m_2(s, y) \leq A_{n^*}$  を満たすノード  $n^*$  を選択し、割り当てる。その結果、 $s_n$  がノード  $n$  に配置された URL の数であるとき、 $s_n \leq B$  を満たしながら、ネットワーク負荷低減と各ノードの FIB エントリの効果的な集約が期待できる。

## 3. コンテンツ配置ノード数の設計法

本節では、本稿で提案するコンテンツ配置ノード数の設計法を述べる。

コンテンツ配置ノード数  $N$  を任意に与え、[2] で提案したコンテンツ割り当て法を適用する。そして配置先ノードには CDN のキャッシュサーバが提供されている状態を想定し、1 つのノードに配置可能なコンテンツ数の上限  $B$  を  $W/N * 1.01$  で設定する。ただし  $W$  はコンテンツ数である。

平均 FIB サイズ  $E$ 、平均リンク負荷  $L$ 、リンクの負荷の変動係数  $C$ 、コンテンツ可用性  $R$  の 4 つの品質尺度を考慮する。

コンテンツ要求先ノード  $s$  の要求比率を  $D(s)$ 、要求元ノード  $d$  の人口比率を  $p(d)$  としたとき、リンク  $l$  を経由するフローの集合を  $F_l$ 、ノード  $sd$  間のフローを  $f_{sd}$  とすると、 $l$  のリンク負荷は  $\sum_{f_{sd} \in F_l} D(s)p(d)$  となる。全リンクにわたるリンク負荷の平均値を  $L$ 、変動係数を  $C$  と定義する。

また、コンテンツ  $x$  の要求比率  $q_x$ 、ノード  $n$  に配置したコンテンツ集合  $O(n)$  に対し、ノード  $n$  の障害発生時、Interest パケットが転送できず、 $G_n = \sum_{x \in O(n)} q_x$  の比率の配信要求に対してオリジナルへの到達性が喪失する。本稿では単一ノード障害を想定し、障害発生時に可用性が喪失する総要求比率の最大値、すなわち  $G_n$  の全ノード中の最大値をコンテンツ可用性  $R$  と定義する。

4 つの各評価尺度を、各々、最小値を引いて最大値で割ることで  $0 \sim 1$  に正規化した値を  $E'$ 、 $L'$ 、 $C'$ 、 $R'$  とする。また、 $0 \sim 1$  の値をとる設定パラメータ  $w_1, w_2, w_3, w_4$  をこれら各尺度の重みとし、

$$D = w_1 E' + w_2 L' + w_3 C' + w_4 R' \quad (1)$$

で定義されるスコア  $D$  が最小となる配置ノード数を最適配置ノード数  $N^*$  として定義する。

## 4. 性能評価

2017 年 11 月に Alexa の Web ページで公開されているアクセス数上位の 8,000 の Web ページ [3] を閲覧したときに、アクセスされたオブジェクトサーバの URL を取得し、CDN を用いて配信されたものを除き、さらに米国内に配信サーバが存在する 12,010 個の URL を対象に評価を行う [1]。

表 1 に記す 6 つの米国のバックボーンネットワークトポロジ [6] を評価に用いる。配置ノード数  $N$  の最大値は 30 としたが、Internet2 のみは最大値は 12 となる。

表 2 に各トポロジ、重み設定パターンに対する最適配置数  $N^*$  を示し、図 1、図 2、図 3、図 4 に  $N$  を増加させた場合の、各評価尺度の正規化値を示す。 $N$  の増加に伴い、おおよそ、 $E$  と  $L$  は増加する半面、 $C$  と  $R$  は減少する。

表 1: 評価に用いたネットワークトポロジ

	ノード数	リンク数	平均次数
Allegiance Telecom	53	176	3.32
ATT	93	308	3.31
Verio	35	144	4.11
At Home Network	46	110	2.39
CAIS Network	37	88	2.37
Internet2	12	42	3.50

評価尺度の重みの設定方法として、 $E$  の重みを 0.7 とし、他の 3 つの尺度の重みを全て 0.1 としたとき (W1) と、同様に、 $L$ ,  $C$ ,  $R$  の各々の重みを 0.7 として他を 0.1 とした場合 (W2, W3, W4) と、さらに 4 つの全尺度の重みを均等に 0.25 とした場合 (EQ) の 5 つで評価する。

W1 は平均 FIB サイズに重み 0.7 を置いたときであり、全コンテンツを 1 カ所にまとめて配置すると、他ノードから本ノードに至る経路は、同じ TLD をもつオブジェクトであれば 1 つに集約される。しかし  $N$  の増加に伴い、出力ポートが多数のポートに分散するため、FIB のエントリ集約が難しくなり、平均 FIB サイズは増加する。各トポロジで  $D$  の増加量は異なるが、ノード数が少ない時ほど FIB 集約効果は向上するため多くのトポロジにおいて  $N^*=1$  が最適となる。

W2 は平均リンク負荷に重み 0.7 を置いたときである。このとき、中心ノード近くに要求比率の高いノードを配置することで、ネットワーク全体からコンテンツを取得しやすくなり、平均リンク負荷は低下する。そのため、 $N$  の増加に伴いコンテンツがネットワーク上に分散して配置され平均リンク負荷が増加するため、やはり  $N$  が小さい場合が最適となる。

W3 はリンク負荷の変動係数に重み 0.7 を置いたときである。ネットワークの中心から順に URL を配置していくため、配置ノード数が少ないときは中心近くのリンク負荷が大きく、中心から離れたノードのリンク負荷は小さくなるため、変動係数は大きい。 $N$  の増加に伴い、コンテンツがネットワーク全体に配置されるため、ネットワークの中心だけでなく全体にリンク負荷が分散され変動係数は減少する。そのため  $N$  は大きな値が最適となる。

W4 はコンテンツ可用性に重み 0.7 を置いたときである。 $N$  の増加に伴い、各コンテンツ配置ノードの配置コンテンツ数は減少するため、 $R$  は減少する。そのため  $N$  は大きな値が最適となる。

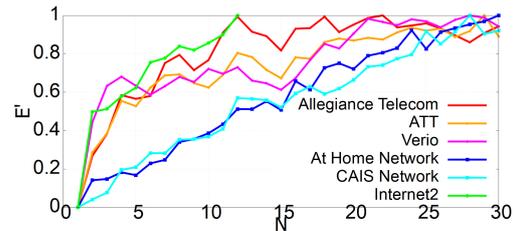
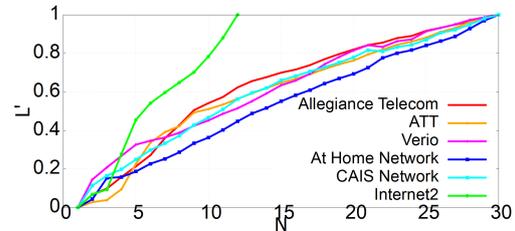
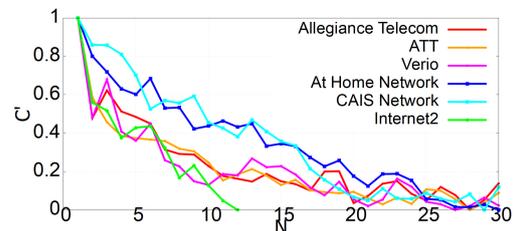
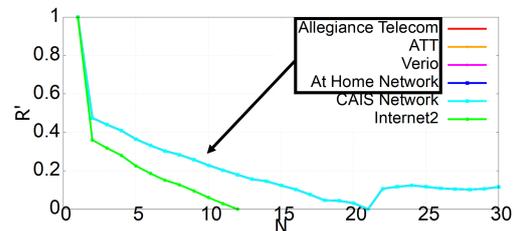
EQ は全尺度の重みを均等に 0.25 ずつ置いた時である。この場合、 $N$  が 2~9 程度の時が最適となる。このように提案方式を用いることで、設計者の設計ポリシーに応じた適切なコンテンツ配置ノード数の選択が可能となる。

表 2: コンテンツの配置ノード数の最適値  $N^*$ 

	W1	W2	W3	W4	EQ
Allegiance Telecom	1	2	28	21	2
ATT	1	2	28	21	3
Verio	1	1	21	21	9
At Home Network	1	2	27	21	5
CAIS Network	2	1	21	21	6
Internet2	1	2	12	12	3

## 5. まとめ

本稿では、ネットワークの中心から人気コンテンツを配置する時にノード数を限定し、4 つの尺度の評価重みやトポロジが、最適な配置ノード数に与える影響について考察した。今後は、配置するノード順を変えた場合の比較や考察を行い、FIB

図 1:  $N$  に対する正規化平均 FIB サイズ  $E'$ 図 2:  $N$  に対する正規化平均リンク負荷  $L'$ 図 3:  $N$  に対する正規化リンク負荷の変動係数  $C'$ 図 4:  $N$  に対する正規化コンテンツ可用性  $R'$ 

サイズ集約とネットワーク負荷を更に低減するためのコンテンツ配置方式を検討する。また、本稿ではコンテンツが静的で変化しない条件を想定したが、コンテンツが動的に生成・消滅する場合の動的なコンテンツ配置方法についても研究を行う予定である。

## 謝辞

本研究成果は JSPS 科研費 21H03437 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Y. Sasaki, et al., “Designing Content Placement of CDN for Improving Aggregation Effect of ICN FIBs”, ICOIN 2020
- [2] 橋本紘輝, 上山憲昭, “ICN の FIB サイズとネットワーク負荷低減を目的としたコンテンツ配置制御”, 2022 信学会ソ大会, B-11-10, 2022 年 9 月
- [3] Alexa webpage, <https://www.alexametrics.com/siteinfo>
- [4] E. Nygren, R. K. Sitaraman, and J. Sun, The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications, ACM SIGOPS 2010.
- [5] L. Zhang, et al., Named Data Networking (NDN) Project, Technical Report NDN-0001, Oct. 2010.
- [6] CAIDA webpage, <http://www.caida.org/data>