

NDNのFIB集約とネットワーク品質向上を目的としたコンテンツ配置法

橋本 紘輝[†] 上山 憲昭[†]

[†] 立命館大学 情報理工学科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
E-mail: †his0518ek@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@ritsumei.ac.jp

あらまし 近年、デジタルコンテンツやIoT (Internet of Things) データを効率的に配信できる情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) が大きな注目を集めている。ICNでは、コンテンツ名でデータを要求可能であり、ルータの転送テーブル (FIB: forwarding information base) を参照して要求パケットを送信する。しかし多くの場合、コンテンツの名称は場所に依存しないため、FIBのエントリ集約は困難である。一方、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が、CDNのこれらの目的はICNにより達成される。CDNのキャッシュサーバを活用してコンテンツのオリジナルを再配置することで、FIBのエントリ集約効果の向上が期待できる。そこで筆者らは、ICNの中でもNDN (named data networking) を想定し、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、LPM (longest prefix matching) を用いてFIB集約効果が向上するようコンテンツを再配置することを提案した。本稿では、FIBサイズだけでなく、ネットワーク負荷の低減など他の評価尺度の向上をも同時に考慮したコンテンツ配置方法を提案する。また、配置ノードを少数に限定することでFIBエントリサイズの更なる低減が期待される。そこで、配置ノード数を限定したときの平均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つの評価尺度を考慮したコンテンツ配置ノードの設計法を提案する。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も明らかにし、平均度数によって分類したトポロジタイプにおいて、異なる配置ノード数で最適になることを示す。

キーワード 情報指向ネットワーク, NDN, 転送テーブル, FIB集約

Placing Contents with Reducing FIB Size and Improving Network Quality in NDN

Hiroki HASHIMOTO[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] Ritsumeikan University 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577
E-mail: †his0518ek@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@ritsumei.ac.jp

Abstract In recent years, Information-centric networking (ICN) has attracted wide attention as a new network architecture which can efficiently deliver digital content and Internet of Things (IoT) data. In ICN, we can request data by the name and send request packets by referring to router's FIB (forwarding information base). However, prefix aggregation of FIB of ICN routers is difficult because the organization names are independent of location. On the other hand, CDN (content delivery network) is widely used as a technology to improve the delivery quality of users and reduce the amount of traffic in the network and the objectives of CDN are achieved by ICN. Using CDN, we can aggregate FIB's entry by replacing the contents which publisher delivery from their server. We use NDN (named data networking) in ICN, we proposed to use the CDN as a method of allocating originals of content and replace them to make FIB's entry size small by using LPM (longest prefix matching) in FIB aggregation methods. In this paper, we propose the method to reduce network load and to improve other network metrics as well as to aggregate FIB's entry. In addition, limiting the number of nodes which place can reduce the FIB entry size. Then, we propose a design method for content placement node considering four evaluation scale: average FIB size, average link load, coefficient of variation of link load, and content availability when the number of placement nodes is limited. Through numerical evaluation using multiple types of topologies, we reveal the influence of evaluation weights of topologies and scales on the optimal number of nodes to be arranged.

Key words Information Centric Networking (ICN), named data networking (NDN), Forwarding Information Base(FIB), FIB Aggregation

1. はじめに

インターネットや SNS の普及により、YouTube などのユーザ生成コンテンツ (UGC) が増大している。また、高速・大容量・同時多接続の 5 G 通信の普及に伴って、農業や企業の工場などでは IoT (Internet of Things) の実用化が進められており、IoT デバイスから取得した膨大なセンサデータの活用にはその処理が必要である。そこで、コンテンツを効率的に配信する次世代のネットワークとして ICN (Information-Centric Networking) が注目されている。ICN ではコンテンツの名称を用いて配信要求を行うため、コンテンツの配信元を特定せずに直接コンテンツを要求することが可能である。そのため、膨大な数のデータが動的に生成される IoT 通信や、データの所在が事前に分からない災害時通信において、効率的にデータ通信を行うネットワークとして注目されている。ICN の中でも NDN (Named Data Networking) が主流であり、本稿では NDN を想定する。

NDN では IP アドレスを用いた従来の通信法と同様に、ルータにおいて FIB (Forwarding Information Base) と呼ばれる経路制御表を参照することで NH (Next Hop) に interest (配信要求) を転送する。FIB では prefix と NH の組によってエントリが作成されるが、IP ルータの FIB では転送先 IP アドレス、NDN ルータの FIB ではコンテンツ名が prefix として用いられ、コンテンツ名は、prefix とコンテンツ ID から構成される。NDN のコンテンツのオリジナルは publisher のホストに存在し、publisher はコンテンツ名の prefix を隣接ルータに広告する [14]。prefix 広告を受信する NDN ルータは、ユーザである subscriber から送信された interest が要求するコンテンツが publisher のホストに転送されるように FIB を構成する。

FIB に全ての prefix のエントリを作成した場合、FIB に必要なメモリサイズは大幅に増加する。したがって、FIB のメモリコストを削減するためには、FIB エントリの集約が不可欠である。IP 通信の場合、管理団体によって国や地域ごとに一定範囲のアドレスを割り当てるため、IP アドレスには地理的な局所性が存在する。しかし NDN の場合、同じ組織のコンテンツを提供する publisher のホストは同じ地域に存在する傾向にあるが、組織名は地理的な局所性はない。そのため、NDN の FIB における prefix の集約は困難となる。例えば Web ページをコンテンツと見なした場合、約 10^{11} のコンテンツ名があり、同じ組織の prefix を 1 つの Prefix に集約した後であっても、約 10^9 のコンテンツ名の prefix がある [5]。異なる組織間の prefix 集約は難しく、NDN の各 FIB には約 10^9 エントリが必要であるが [5]、IP ネットワークの各 FIB には約 10^5 エントリでよい。ハッシュ表 [10] に基づいたエントリ検索を行う場合、数百万の prefix に対して数メガバイトのメモリが FIB に必要であるため、SRAM を使用した FIB の実装は困難である。

インターネットにおいて、ウェブコンテンツを効率的に配信できる仕組みとして CDN (content delivery network) が使用されている。CDN ではオリジンサーバからコンテンツのコピーを取得したキャッシュサーバが代わりに配信を行うことで、距離が近いサーバからコンテンツを取得可能なため、配信品質の向上と、ネットワークトラフィック量の削減が実現可能である。

NDN では、コンテンツがユーザ近くのルータでキャッシュされ、配信される可能性が高いことから、CDN の目的は NDN によって満たされる。そこで先行研究では、CDN のキャッシュサーバはキャッシュされたコンテンツの prefix をネットワークに広告すること [2] や、publisher のホストになることが可能であることから、コンテンツのコピーを CDN のキャッシュサーバに配置することで、NDN ルータの FIB エントリの低減を行った [12]。しかしコンテンツ配置はネットワークを流れるトラフィック量や配信フロー長に大きな影響を与えるが、文献 [12] ではリンク負荷の低減は考慮していない。

そこで本稿では文献 [12] を拡張し、平均リンク負荷についても考慮する。また、文献 [12] では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、平均 FIB サイズの低減が期待される。そこで、平均リンク負荷の考慮に加えて、配置ノード数を限定したときの平均 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 つの評価尺度を考慮したコンテンツ配置ノードの設計法を提案する。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も明らかにする。

以下 2 節では関連研究について説明し、そして 3 節では、平均リンク負荷を考慮したコンテンツ配置方式の詳細とその効果について説明する。4 節では、3 節で説明した方式について配置ノード数を限定して適用した方式について述べ、最適な配置ノードを示し、その効果や影響を説明する。最後に 5 節で本稿についてまとめ、今後の方針を述べる。

2. 関連研究

2.1 NDN の FIB サイズ削減法

NDN ルータの FIB エントリ数を削減する方式として、これまでに (1) 部分キャッシュ、(2) ルート集約、(3) フラッディング、(4) ブルームフィルタ、(5) LPM の 5 つの方式が提案されている。部分キャッシュでは、すべての prefix ではなく一部の prefix に対して FIB エントリが作成される [1] [5]。文献 [1] では DNS を使用し、エントリがルータの FIB に存在しない場合の名前解決法を提案している。到着する interest の prefix のエントリがルータの FIB に存在しない場合、ルータは否定応答を subscriber に返す。そして subscriber は DNS を用いて、要求コンテンツと同じドメインを有するルータの FIB にエントリが存在する prefix を得て、その prefix に対し interest を送信する。また文献 [5] では、ルックアンドキャッシュアプローチを提案している。つまりルータは NRS (name routing system) サーバから取得したルーティング情報をルータの FIB にキャッシュする。本アプローチでは FIB のサイズは縮小されるが、名前検索が必要となる。

2 番目のアプローチであるルート集約では、すべての interest が NAC (name collector) と呼ばれる同一のルータを通過するように FIB が設定される [8]。NAC がルートノードであるツリートポロジで NAC に向けて interest が送信されるため、ルータに必要な FIB のサイズが削減されるが、interest の転送ホップ長は増加する。

3 番目のアプローチ、すなわちフラッディングでは、FIB 検

索を行わずにルータのすべての出力面に interest がブロードキャストされる [2] [3]. 文献 [2] ではルータで interest をブロードキャストし, prefix をキャッシュしている隣接ルータは, 要求元ルータにルータ情報を返す. 文献 [3] では, 人気のないコンテンツアイテムの interest を転送し, FIB を使用せずに人気のあるコンテンツアイテムの interest をブロードキャストすることを提案した. 人気コンテンツのコピーは多くのルータでキャッシュされる可能性が高いため, interest をブロードキャストすることで, 要求されたコンテンツを持つルータに interest が高い確率で届く. ただし interest は冗長に転送されるため, ネットワークリンクが過負荷になる可能性がある.

最後に 4 番目のアプローチ, つまりブルームフィルタでは, ルータが各出力フェースで提供されるブルームフィルタを使用し, 到着する各 interest を各出力フェースに転送するか否かを判断する [6] [7]. ブルームフィルタを使用することで, ルータは限られた数のメモリアクセスで小さなサイズのメモリを使用して, interest 転送の決定が可能である. ただし interest を誤った出力面に転送する可能性があり, 冗長な interest 送信によりネットワーク負荷が増加する.

2.2 LPM を使用した FIB 集約法

文献 [12] では, IP ルータで FIB のサイズを低減させるために用いる LPM (longest prefix matching) を NDN ルータに適用している. アプローチとしては (1)URL の文字の単位 (2)URL のコンポーネントのユニット, の 2 つが考えられるが, ここでは (2) を利用している. コンポーネントは URL のピリオドで区切られた文字列として定義し, 例えば, “www.ritsumei.ac.jp” の URL は “www”, “ritsumei”, “ac”, “jp” で構成される 4 つのコンポーネントである. NDN における FIB の prefix は, コンポーネントで分離した後に逆順で並び替えたものを連結したものの, つまり, “jp / ac / ritsumei / www” である. URL の最初のコンポーネントは TLD (top level domain) であり, URL の 2 番目のコンポーネントは SLD (second level domain) とし, URL のコンポーネントは LPM の単位として使用する. 以後, 本稿ではコンテンツとして Web オブジェクト^(注1)を想定する.

各ノード n にて, ノード n にオリジナルが割り当てられたオブジェクトを除くすべてのオブジェクトに対して FIB エントリを作成する. このアルゴリズムは各ノードで独立に実行できるため, 以下では 1 つのノードに焦点を当てる. FIB のエントリ x の prefix を $p(x)$ で, $p(x)$ の最初から s 番目までのコンポーネントを $p(x, s)$ で示す. さらにルーティングアルゴリズムによって設定される FIB エントリ x の出力ポートを $F(x)$ とする. また, M を, 未チェックの FIB エントリの集合と定義し, URL のコンポーネントの最大数を C とする.

最初に TLD を対象に FIB エントリを集約し ($s = 1$), 次のステップでは TLD と SLD の組に対し FIB エントリを集約する ($s = 2$). すべてのコンポーネントの位置 $1, 2, \dots, C - 1$ での集約が各々, 完了するまで本手順が繰り返される. この方法は FIB エントリを逆方向, すなわち $s = C - 1$ から $s = 1$ の順に集約することも可能である.

(注1): Web ページを構成するデータの単位で, アイコンなどの画像やテキスト, 広告といった多様なものから構成される.

2.3 コンテンツ再配置による NDN の FIB 集約法

FIB エントリのほとんどすべての集約効果は TLD と SLD で得られる [12]. そのため筆者らは, TLD と SLD のみでの FIB エントリの集約を考慮した, CDN キャッシュサーバのコンテンツ配置設計を提案した [12]. オリジナルが同じノードに存在する prefix に対しては, 各ノードの FIB において同一の出力フェースが設定される. したがって “com” 等の順位が高い TLD を有する Web オブジェクトを同一ノードに配置することにより, FIB エントリ数を効率的に減らすことができる. 極端なケースでは, すべての Web オブジェクトが 1 つのノードに配置され, すべての FIB エントリが 1 つのエントリに集約された場合である. ただしすべての Web オブジェクトとそのリンクが接続されたノードにトラフィック負荷が集中するため, トラフィック量を緩和するにはすべてのノードに可能な限り均等に Web オブジェクトを配置する必要がある. したがって, 1 つのノードに配置される Web オブジェクトの最大数を上限 B 以下に制限する.

本方式を用いることで, コンテンツをオリジナルの位置に配置したときと比べて約 45 % 程度集約できることを示している.

3. 平均リンク負荷を考慮した FIB 集約法

3.1 要求比率優先配置

既存研究 [12] ではノードの位置を考慮せずオブジェクト数の降順にコンテンツの配置を行った. そこで本節ではコンテンツの配置場所と配置順を変更することで FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低減するコンテンツ配置方式を提案する.

提案方式では, ネットワークの中心から高人気コンテンツを配置する. つまり, 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から優先して割り当てる. その時, TLD や SLD が同じオブジェクトを同一のノードに配置することで FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低減させることが可能となる. 以下ではその詳細を説明する.

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 TLD が 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 TLD s 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。

3.2 性能評価条件

数値評価として米国のバックボーンネットワークである図 1 に示す Internet2 のトポロジを利用した [13]。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 [15] 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。ネットワークすべてのノードに CDN のキャッシュサーバが提供されている状態を想定し、各ノードに上限値 B を設けることで割り当てるオブジェクト数を均等化する。Web オブジェクトの数 W が 12,010 であるため、 B を $W/N * 1.01 = 1,010$ とする。ただし N はノード数 12 である。

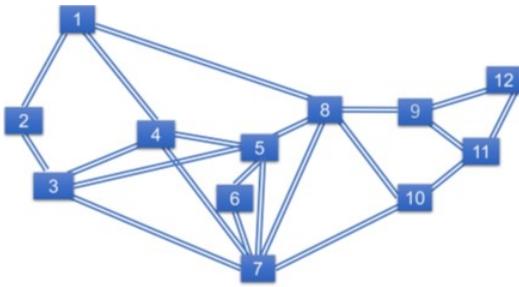


図 1 Internet2

3.3 性能評価

平均 FIB サイズと平均リンク負荷の 2 つの評価尺度の観点から性能を評価する。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、ネットワークを構成する全リンクの平均リンク負荷 L は、次式で得られる。

$$L = \frac{\sum_{f_{sd} \in F_l} D(s)p(d)}{M} \quad (1)$$

ただし M はリンク数で、ノード間リンクは双方向で考慮するものとし、Internet2 のリンク数は 42 である。

図 2(a) に、再配置を行わないオリジナル配置 (Original) と、要求比率の降順でネットワークの中心からドメインを割り当てる提案方式 (Proposed) の各々において、2.2 節で述べた FIB 集約法を適用した後の、各ノードの FIB サイズの平均値 S を各々示す。提案方式は再配置を行わないオリジナル配置と比較すると約 2 割の削減が可能である。

また図 2(b) に平均リンク負荷 L を同様に示す。提案方式は要求比率が高い URL をホップ長の平均値が小さいネットワークの中心に位置するノードに優先した配置する結果、平均リンク負荷を抑えることができ、再配置を行わないオリジナル配置と比べて約 2 割、平均リンク負荷の削減が可能である。

したがって、要求比率優先配置方式は平均 FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低下させることが可能である。

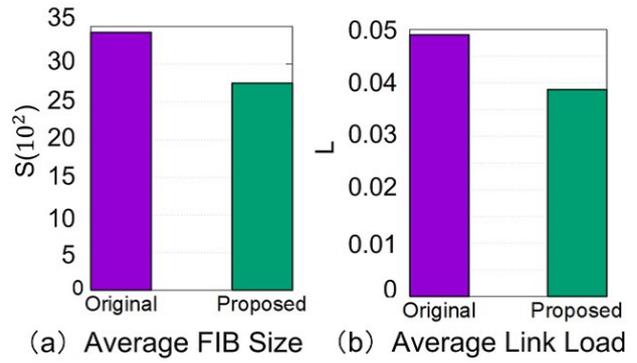


図 2 (a) 平均 FIB サイズ (b) 平均リンク負荷

4. コンテンツ配置ノード数設計法

4.1 コンテンツ配置方式

前節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、配置ノード数を限定することで、さらなる FIB サイズや平均リンク負荷の低減が期待できる。そこで、コンテンツ配置ノード数 N を任意に与え、前節で提案した要求比率優先配置方式を適用する。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の数の上限 B を $W/N * 1.01$ と設定する。ただし、 W はコンテンツ数である。

4.2 最適配置ノード数の設計

N を少数に限定して配置したとき、ネットワークの中心では負荷集中が予想される。そこで本提案方式では、リンク負荷の偏りや障害発生時のコンテンツの可用性についても考慮する。具体的には、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 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 0~1 に正規化した値を E' 、 L' 、 C' 、 R' とする。また、0~1 の値をとる設定パラメタ w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 をこれら各尺度の重みとし、

$$D = w_1 E' + w_2 L' + w_3 C' + w_4 R' \quad (2)$$

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。

4.3 評価条件

前節で用いた Internet2 と図 3 に示す 5 つの米国の商用 ISP のバックボーンネットワークトポロジを評価に用いる [13]。本研究では、平均次数 3.0 以上のネットワークトポロジを Hub&Spoke(H&S) 型、平均次数 3.0 未満のネットワークトポロジを Ladder 型と定義し、これらトポロジのノード数、リン

ク数、平均次数を表 1 にまとめる。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 1 評価に用いた米国商用ネットワークトポロジ

H&S 型	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
Internet2	12	42	3.50

Ladder 型	ノード数	リンク数	平均次数
At Home Network	46	110	2.39
CAIS Network	37	88	2.37

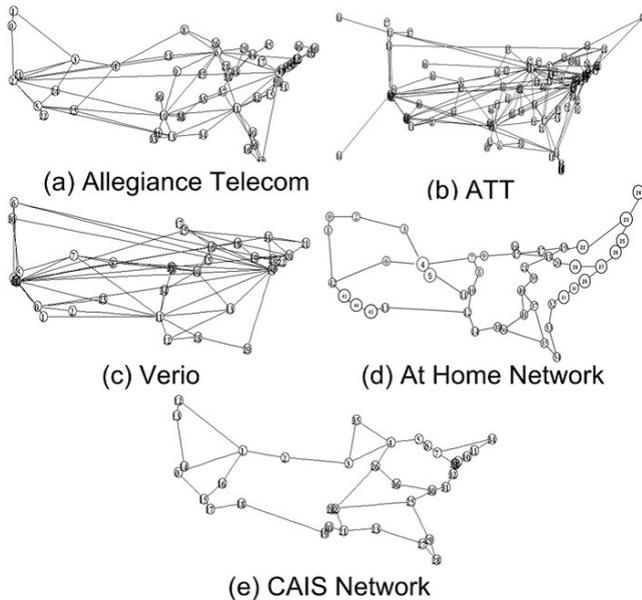


図 3 ネットワークトポロジ

4.4 配置ノード数が各評価尺度に与える影響

図 4, 図 5, 図 6, 図 7 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, おおよそどのトポロジでも, E' と L' は増加する半面, C' と R' は減少する。そして E' と C' において, H&S 型と Ladder 型で変化の様子が異なる。また図 8 にコンテンツ配置ノードの平均次数, 図 9 に各コンテンツ配置ノード d への全ノードからの最短経路上に存在する d 以外のコンテンツ配置ノードの数の平均 H を, 同様に示す。

H&S 型はノードの平均次数が Ladder 型と比べて大きく, ネットワークの中心ノードは特に次数が高い傾向があるため, コンテンツ取得経路上にコンテンツ配置ノードがある割合が低い。そのため, 経路上に同一 TLD をもつ Web オブジェクトが配置されにくく, N の増加に伴う平均 FIB サイズの増加度が大きい。逆に, 多くのリンクと繋がるノードにコンテンツが配置され, 経路も分散されるため, リンク負荷の変動係数の N の増加に伴う減少度が大きい。

一方で, Ladder 型のトポロジではノードの平均次数が小さく, ネットワークの中心ノードでの次数の大きさは周辺ノードと比べて H&S 型ほど大きくない。そのため, コンテンツ取得経路上にコンテンツ配置ノードがある割合が高く, コンテンツ取得経路が重複しやすい。同一経路上の FIB の出力ポートは, 同一ポート番号に限られるため, N の増加に伴って, 平均 FIB サイズは緩やかに増加する。しかし, コンテンツ取得経路が多

数に分岐しにくいことで, 負荷が同一リンクに集中し, リンク負荷の変動係数の N の増加に伴う減少は緩やかである。

4.5 最適配置ノード数

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。

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^* を示す。 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。

このように 1 つの指標に重点的な重みをつけた場合はトポロジのタイプによらず類似した結果が得られたが, 一方で全ての指標に同じ重みをつけた場合 (EQ), トポロジのタイプごとに異なる傾向を示した。

H&S 型のトポロジでは N の増加に伴う平均 FIB サイズの増加度とリンク負荷の変動係数の減少度が大きい。 L' は N が小さいほど値が小さくなり, R' は N が大きいほど値が小さくなるため, N^* は小さな値となる。 Verio は H&S 型のトポロジであるが, ノード数に対するリンク数が多く, 平均次数が他の H&S 型トポロジよりも大きい。そのため, 出力ポートが多数のポートに分散されやすく, FIB エントリサイズの集約度が特に低い。そのため, 平均 FIB サイズが他の H&S 型よりも急激に大きくなるため, H&S 型と比べて最適配置数が大きくなる。

一方で, Ladder 型のトポロジでは N の増加に伴う平均 FIB サイズの増加度と平均リンク負荷の変動係数の減少度が小さい。 N の増加に伴う L' と R' の変化は H&S 型と変わらないため, Ladder 型の N^* は H&S 型より少し大きい値となる。

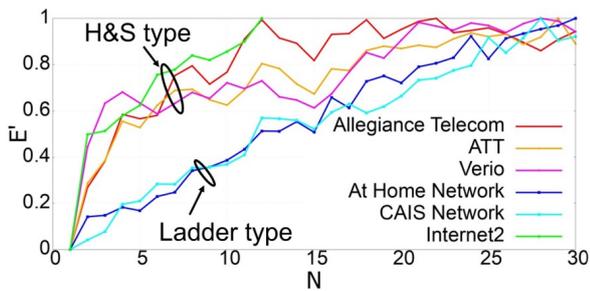


図4 N に対する正規化平均 FIB サイズ E'

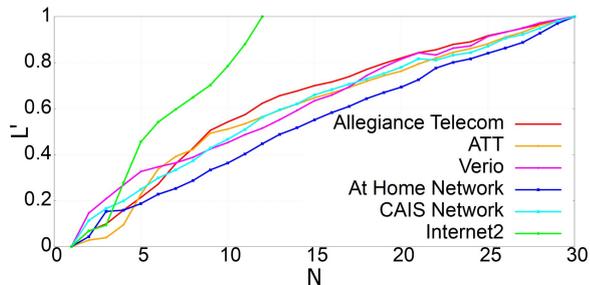


図5 N に対する正規化平均リンク負荷 L'

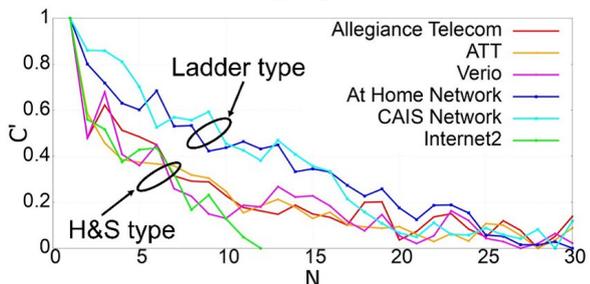


図6 N に対する正規化リンク負荷の変動係数 C'

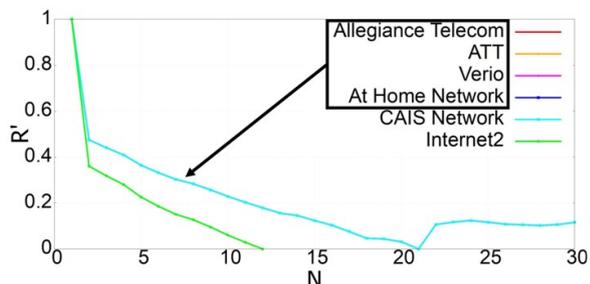


図7 N に対する正規化コンテンツ可用性 R'

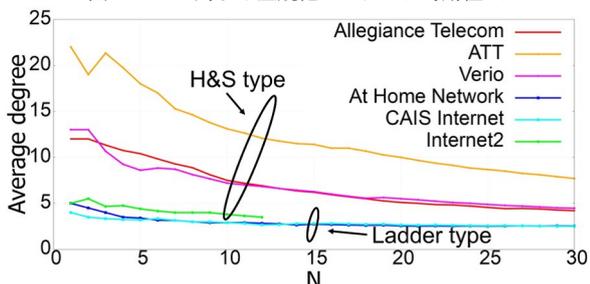


図8 N に対するコンテンツ配置済みノードの平均次数

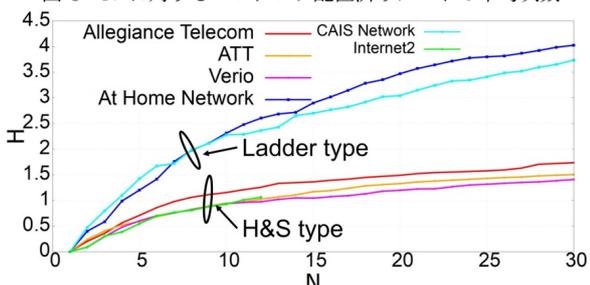


図9 N に対する最短経路上のコンテンツ配置済みノード数の平均 H

表2 コンテンツの配置ノード数の最適値 N^*

H&S 型	W1	W2	W3	W4	EQ
Allegiance Telecom	1	2	28	21	2
ATT	1	2	28	21	3
Verio	1	1	21	21	9
Internet2	1	2	12	12	3

Ladder 型	W1	W2	W3	W4	EQ
At Home Network	1	2	27	21	5
CAIS Network	2	1	21	21	6

5. まとめ

本稿では、まずネットワークの中心から高人気コンテンツを配置することで平均 FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低減可能であることを示した。そして本コンテンツ配置法でノード数を限定し、4つの尺度の評価重みやトポロジタイプを考慮した際の、最適な配置ノード数に与える影響について考察した。そして、評価重みが一定であるとき、ネットワークの中心から配置すると、H&S型とLadder型では最適な配置ノード数が異なる傾向があることを確認した。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 の援助を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] A. Afanasyev, et al., SNAMP: Secure Namespace Mapping to Scale ICN Forwarding, GIS 2015.
- [2] O. Ascigil, S. Rene, I. Psaras, and G. Pavlou, On-Demand Routing for Scalable Name-Based Forwarding, ACM ICN 2018.
- [3] R. Chiocchetti, D. Rossi, and G. Caroglio, Exploit the Known or Explore the Unknown? Hamlet-Like Doubts in ICN, ACM ICN 2012.
- [4] J. Choi, J. Han, E. Cho, T. Kwon, and Y. Choi, A Survey on Content-Oriented Networking for Efficient Content Delivery, IEEE Commun. Mag., vol.49, no.3, pp.121-127, Mar. 2011.
- [5] A. Detti, M. Pomposini, N. Blefari-Melazzi, and S. Salsano, Supporting the Web with an information-centric network that routes by name, Elsevier Computer Networks, Vol. 56, No. 17, pp. 3705-3722, Nov. 2012.
- [6] K. Katsaros, et al., On the Inter-domain Scalability of Route-by-Name Information-Centric Network Architectures, IFIP Networking 2015.
- [7] A. Rodrigues, P. Steenkiste, A. Aguiar, Analysis and Improvement of Name-based Packet Forwarding over Flat ID Network Architectures, ACM ICN 2018.
- [8] T. Schmidt, S. Wolke, N. Berg, and M. Wahlisch, Let's Collect Names: How PANINI Limits FIB Tables in Name Based Routing, IFIP Networking 2016.
- [9] G. Xylomenos, et al., A Survey of Information-Centric Networking Research, IEEE Communications Survey and Tutorials, Vol. 16, No. 2, pp.1024-1049, 2014.
- [10] W. So, A. Narayana, and D. Oran, Named data networking on a router: Fast and DoS-resistant forwarding with hash tables, ACM/IEEE ANCS 2013.
- [11] L. Zhang, et al., Named Data Networking (NDN) Project, Technical Report NDN-0001, Oct. 2010.
- [12] Y. Sasaki, et al., Designing Content Placement of CDN for Improving Aggregation Effect of ICN FIBs, ICOIN 2020.
- [13] CAIDA webpage, <http://www.caida.org/data>
- [14] A. Hoque, et al., NLSR: Named-data Link State Routing Protocol, ACM ICN 2013.
- [15] Alexa webpage, <https://www.alexa.com/siteinfo>