

2024年度

修 士 論 文

NDNのFIB集約のためのGAを用いたコン
テナ配置法

指導教員: 上山 憲昭

立命館大学大学院 情報理工学研究科
情報理工学専攻 博士課程前期課程
計算機科学コース

学生証番号: 6611230042-3

氏名: 橋本 紘輝

概要

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新しいネットワークアーキテクチャとして、ICN (Information-Centric Networking) が注目されている。ICNの中でも代表的なNDN (Named-Data-Networking) では、IP アドレスではなく名前でデータを要求する。その際、ルータのFIB (Forwarding Information Base) を参照してリクエストパケットを送信する。一方、ネットワークにおけるユーザの配信品質を向上させる技術としてCDN (Content Delivery Network) が広く利用されている。先行研究では、コンテンツを公開するオリジンサーバからネットワーク上のCDN キャッシュサーバにコンテンツのオリジナルを再配置することでFIBのエントリサイズを削減することを提案している。しかし、ネットワーク上のコンテンツ配置はネットワークの性能に影響するため、FIBサイズだけでなく他の指標も考慮した最適配置を決定することは困難である。

本論文では、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いて、FIB エントリの集約だけでなく、ネットワーク負荷の軽減や他のネットワークメトリクスの改善を行う手法を提案する。2種類の異なるタイプのトポロジでの数値評価により、提案手法がネットワークに生じる負荷集中を抑制しつつ、FIB エントリサイズを削減できることを示す。また、コンテンツ配置時に発生するコンテンツ移動コストを考慮したGA 配置法を検討する。

目次

概要	1
第 1 章 序論	4
1.1 研究背景	4
1.2 研究目的	5
第 2 章 関連研究	6
2.1 FIB エントリ削減手法	6
2.2 コンテンツ配置制御手法	6
第 3 章 提案方式	8
3.1 コンテンツ配置法の課題	8
3.2 遺伝的アルゴリズム (GA)	8
3.3 提案方式のデザイン	9
3.3.1 配置アルゴリズム	9
第 4 章 評価条件	10
4.1 評価コンテンツ	10
4.2 ネットワークトポロジ	12
4.3 評価指標	13
4.3.1 リンク負荷	13
4.3.2 コンテンツ可用性	13
4.3.3 ノード負荷	13
4.3.4 コンテンツ移動コスト	14
第 5 章 性能評価	15
5.1 負荷集中を考慮した GA コンテンツ配置	15
5.1.1 設計計画	15
5.1.2 評価	15
5.2 移動コストを考慮した GA のコンテンツ配置	19
5.2.1 設計計画	20
5.2.2 重みによる影響	20
5.2.3 評価	21
第 6 章 まとめ	25

謝辞	26
外部発表文献	29

第1章 序論

1.1 研究背景

現在インターネットで Web コンテンツを取得する際、ユーザは URL を用いて要求し、配信サーバからコンテンツを取得する。このとき、ユーザが配信サーバと通信を確立するには、DNS を用いた名前解決によって配信サーバの IP アドレスを取得する必要がある。しかし、インターネットの普及と拡大による通信の増加と、高速・大容量・同時多接続の 5 G 通信の普及に伴う IoT (Internet of Things) サービスの増加によって、DNS の名前解決時に発生する遅延が課題として考えられている。そこで IP アドレスを用いず、DNS による名前解決処理を必要としない次世代のネットワークとして ICN (Information-Centric Networking)[9][19] が注目されている。ICN ではコンテンツの名称そのもので通信が可能であり、コンテンツ要求者 (subscriber) はコンテンツを提供するサーバ (publisher) に対して要求パケット (Interest) を直接送信することで通信可能となる。ICN の中でも NDN (Named Data Networking)[7][20] が主流であり、本稿ではこれを想定する。

図 1.1 に示すように、NDN の通信では IP アドレスを用いた従来の通信法と同様に、各ルータで 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) のルータに Interest を転送する。そして Interest が publisher に到達すると、転送した経路の逆順にデータパケット (Data) が送信される。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 [10]。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 publisher のホストに転送されるように FIB を構成する。

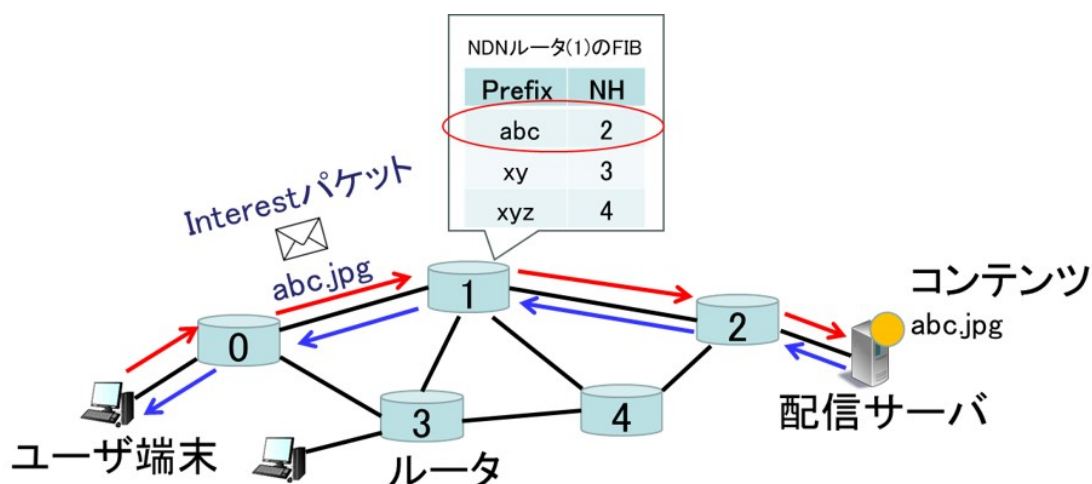


図 1.1: NDN のコンテンツ配信システム

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 [17]。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 [8] が、IP ネットワークの各 FIB には約 10^5 エントリしか必要ない。ハッシュ表 [17] 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、遅延時間の低減や、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 ルータではコンテンツをキャッシュすることが可能であるため、subscriber の近くから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。

1.2 研究目的

既存研究では FIB サイズ削減のために複数の手法がこれまで提案されているが本研究では中でもコンテンツ配置制御法に取り組む。本手法において先行研究では、似た名前のコンテンツを同じ CDN キャッシュサーバに再配置することで、FIB エントリを効果的に集約することが可能であることを提案している [14]。また、似た名前のコンテンツを人気が高い順に、ネットワークの中心から同じ場所に配置することで、リンク負荷も同時に低減させるコンテンツ配置法も提案している。しかし先行研究では、コンテンツの配置によって生じるノードやリンクの負荷集中を考慮については未検討である。また、コンテンツの配置場所はネットワークの性能に大きく影響を与えるが、複数のネットワーク性能を考慮してコンテンツを再配置するには各コンテンツの配置場所は組み合わせ最適化問題である。そこで本稿では様々な組み合わせ最適化問題に有効な近似解法として知られる遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm)[16] をコンテンツ配置設計に適用し、FIB サイズとネットワーク品質を考慮したコンテンツ配置を提案する。独自のシミュレータを使用し、その有効性を明らかにする。

第2章 関連研究

2.1 FIB エントリ削減手法

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) フラッドイング, (4) ブルームフィルタの 4 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][8]。[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しルータの 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 [8] 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 [15]。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、ルータで必要な 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、すなわちフラッドイングでは、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 [3] [6]。[3] 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。[6] 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 [11][13]。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 コンテンツ配置制御手法

NDN の FIB サイズ削減法の一つに CDN を活用したコンテンツ配置制御法が存在する。本手法は (1) FIB のエントリ集約と (2) コンテンツ配置に分けられる。(1) FIB の集約には IP ルータで FIB サイズを低減させるために用いる LPM (longest prefix matching) を NDN ルータに用いる。コンテンツとして扱う URL を逆順に並び替え、URL のピリオドで区切られた文字列をコンポーネントと定義することで、コンポーネント単位で LPM が適用可能となる。そこで図 2.1 に示すように、同一 TLD (Top Level Domain) や SLD (Second Level Domain) をもち、

NH が同じエントリは集約することが可能となる。(2)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 [3] 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, FIB エントリは Interest が CDN キャッシュサーバに到達されるように NH が設定される. コンポーネントの上位が同じかつ NH も同じ FIB エントリは集約可能となることから, 図 2.2 に示すように同一 TLD や SLD をもつコンテンツを同じ CDN キャッシュサーバに配置することで FIB エントリの効果的な集約が期待できる.

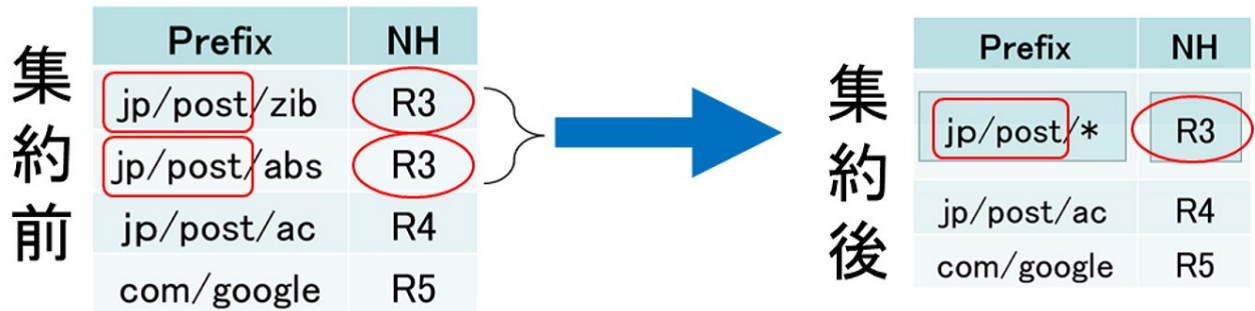


図 2.1: FIB 集約方法

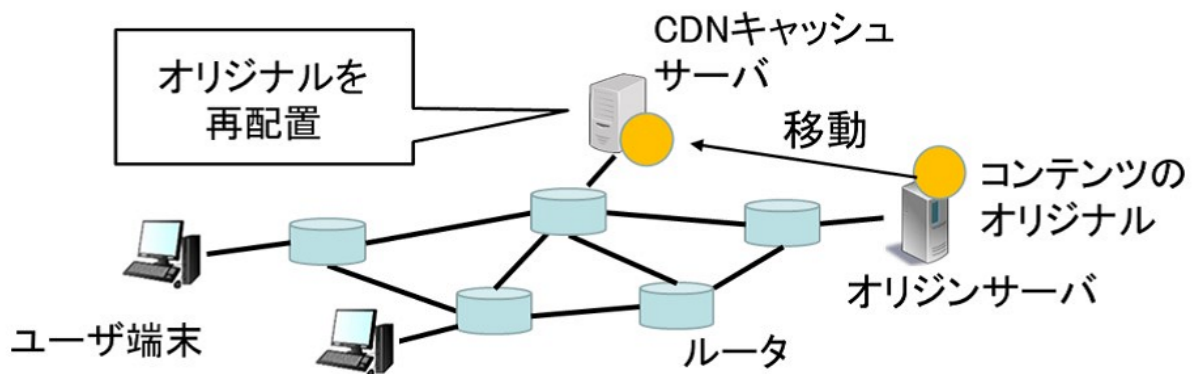


図 2.2: コンテンツ配置制御手法

第3章 提案方式

3.1 コンテンツ配置法の課題

著者はこれまでにコンテンツ配置法について FIB サイズだけでなく、ネットワークトラフィックを考慮した配置を研究した。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に影響を与えるが、既存研究では FIB サイズのみでリンク負荷については考慮していなかったため、ノード位置を考慮し、アクセス比率が高いコンテンツをネットワークの中心に配置することでネットワーク負荷を同時に低減させるコンテンツ配置設計を提案している。また配置ノード数を限定し、平均 FIB サイズ、平均リンク負荷、リンク負荷の変動係数、コンテンツ可用性喪失値の 4 つの評価尺度に基づき配置した際の最適な配置ノード数も示している。

その結果、同じ上位ドメインをもつコンテンツを同一ノードに配置ノード数を限定して配置することで、FIB エントリサイズとリンク負荷を効果的に低減することを実現した。しかし、この配置手法ではコンテンツの要求比率の降順にネットワークの中心から順に配置しているため、ネットワークの中心ノードや中心ノードに接続するノード間リンクでは負荷集中が発生する。また、コンテンツのオリジナルを配信する publisher から CDN キャッシュサーバへコンテンツを再配置する際に、ネットワークでは一時的にトラフィック量が増加することが考えられるが、このとき発生数移動コストについては未考慮である。

FIB エントリの増加に起因するスケール性の問題の解決に加えて、ネットワークに発生するリンク負荷やノード負荷、コンテンツ移動時に発生するコストを同時に考慮した配置を行う問題は、組み合わせ数が多く、NP 困難な問題である。各コンテンツのネットワーク上の配置場所は FIB サイズやネットワーク性能に相互に影響を与えることから、コンテンツ配置は組合せ最適化問題として考えられる。

そこで、様々な組み合わせ最適化問題に有効な近似解法として知られる遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) をコンテンツ配置設計に適用し、FIB サイズとネットワーク品質を考慮した配置方式を提案する。提案方式では、NDN における FIB サイズの集約とネットワーク負荷低減を目的に、CDN キャッシュサーバへのコンテンツのオリジナルの配置に遺伝的アルゴリズムを適用する。解の候補として扱う遺伝子を選択、交叉、突然変異といったダーウィンの進化論を模した計算処理を行うことで最適解を探索する。

以下では利用する GA の概要について述べ、その後 GA をコンテンツ配置に適用した提案方式のデザインについてまとめる。

3.2 遺伝的アルゴリズム (GA)

GA は生物の進化の過程に着想を得て作られた近似解法である。事前に定めた終了条件が満たされるまで、生成した母集団を反復的に洗練させることで近似的な解を求めることが可能となる。

遺伝的アルゴリズムには選択、交叉、突然変異といった特徴的な処理があり、アルゴリズムを適用する問題に対して適切な選択が必要である。

3.3 提案方式のデザイン

提案方式では図 3.1 に示すように，各コンテンツが配置されるネットワーク上のノード位置を遺伝子 g_i とした GA を設計する．TLD が同じコンテンツを同一ノードに配置することで FIB のエントリ集約効果の向上が期待できるためコンテンツは TLD 単位で再配置する．しかし，要求比率が高いコンテンツを同一ノードに配置すると，そのノードに接続するリンクへの負荷集中やノード障害が発生したときにコンテンツの可用性が確保できなくなる．そのため，各コンテンツは要求比率が全コンテンツの中で 1% 以下になるように SLD 単位に分割する．

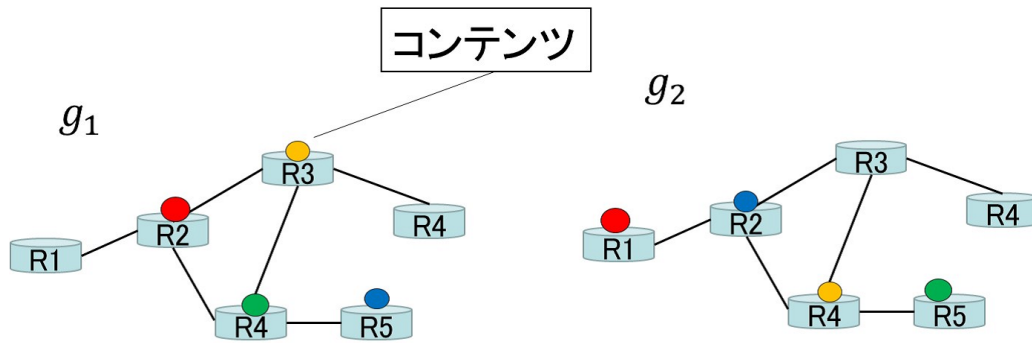


図 3.1: 提案方式のイメージ

3.3.1 配置アルゴリズム

ランダムに生成された初期集団から開始し，生成した各遺伝子 g_i について遺伝子の適応度 $A(g_i)$ を計算する．求めた $A(g_i)$ についてその世代における g_i の順位を評価し，遺伝的アルゴリズムの操作を行うことで近似解を算出する．

以下に GA によるコンテンツ配置アルゴリズムを示す．

1. コンテンツ数 N に対して，ランダムに I 個の初期遺伝子を作成
2. 適応度 $A(g_i)$ である i 位の遺伝子の選択確率 p_i を， I 個の遺伝子の適応度の和 S に占める $A(g_i)$ の割合で計算
3. 選択確率に基づいて，ルーレット選択法で次世代に残す遺伝子を x 個選択
4. 選択された遺伝子に基づいて一定の確率で二点交叉処理を実行し， y 個の子孫遺伝子を生成
5. 一定の確率で突然変異を発生させ，遺伝子をランダムに再構成
6. 上記の手順を G 世代繰り返し，最後の世代で最も適応度が高い遺伝子を最適配置として選択

第4章 評価条件

本研究ではネットワークの性能を複数の観点で評価する．評価に際して各評価指標の定義について本節では述べる．

4.1 評価コンテンツ

Web オブジェクトとして adult, arts, business, computers, games, health, home, kids&teens, news, recreation, reference, regional, science, shopping, society, sports の 16 のカテゴリごとに、Web ページのアクセス数のランキングを公開している Alexa[2] の Web ページから、各カテゴリに対して上位 500 の Web ページの URL を測定対象として選択した．Web ページにアクセスする場合、Google Chrome などの一部の Web ブラウザには各オブジェクトのダウンロード元のホスト URL、各オブジェクトの URL など、さまざまな通信プロパティを含む HAR (HTTP Archive) ファイルをエクスポートする機能がある [4][18]．HAR ファイルには、各オブジェクトのサイズや取得に要した遅延時間等、様々な情報が JavaScript Object Notation (JSON) 形式として出力される．2017 年 11 月に、生成した 8,000 の評価 URL リストの各 URL に対し、福岡大学の測定用クライアント端末から、GUI を使用しないヘッドレス Chrome を使用して、継続的かつ自動的にアクセスした．アクセスした 8,000 の Web ページのうち 7,604 の Web ページから HAR ファイルを正常に取得した.¹

7,604 の Web ページに含まれる Web オブジェクトの累積数は 679,380 であり、HAR ファイルからこれらのオブジェクトの URL を抽出した．CDN はインターネットで広く使用されているため、多くの Web オブジェクトはオリジンサーバではなくキャッシュサーバから配信されている．しかしコンテンツのオリジナルの場所に関する情報を収集するため、キャッシュサーバから配信された URL を除外する．CDN を使用する場合、DNS クエリは CDN プロバイダの DNS サーバにリダイレクトされるため、DNS レコードに“CNAME”という文字列が含まれているものは CDN から配信されたものである可能性が高い．したがって抽出された各 URL に対し、dig コマンドを使用して DNS レコードを取得し、DNS レコードに“CNAME”の文字列が含まれる URL を除いた 20,921 の URL を取得した．さらに、CDN に関連する 5 つのキーワード cdn, edge, akam, cloudfront, cloudflare を含む URL をさらに除外した．2,374 の URL にはこれらのキーワードのいずれかが含まれているため、最終的にオリジンサーバから Web オブジェクトが配信されていると予想される 18,547 の URL を取得した．MaxMind[12] が提供する GeoIP API を使用して、18,547 個のオブジェクトのそれぞれが送信されたホストの国名、都市名、および座標を取得した．各オブジェクトが存在する国に基づいて 18,547 個のオブジェクトを分類したときの、上位 10 か国のそれぞれに分類された URL の数を表 4.1 に示す．18,547 個の Web オブジェクトのオリジナルが 71 か国から提供され、約 64% の Web オブジェクトがアメリカから提供されている．以下の評価では、アメリカに存在するオリジナル 12,010 個の URL を使用する．

¹一部のオブジェクトの取得時にタイムエラーの発生、オブジェクトの一部の URL の IP アドレスを解決不可等の理由により、396 の Web ページの HAR ファイルを取得できなかった．

表 4.1: Number of URLs in each of top 10 countries

Country	URL count	Country	URL count
United States	11,908	Czech Republic	237
Germany	477	France	228
Korea	322	Hong Kong	222
United Kingdom	261	Australia	202
Singapore	241	Ireland	128

本研究では U_x は TLD として x を持つ URL の集合を示し, $U_{(d,y)}$ は TLD として d を, SLD として $D(d,y)$ を有する URL の集合を示す. $P_{(i)}$ と $P_{(d,j)}$ を, $U_{(x)}$ と $U_{(d,y)}$ に含まれる URL の要求比率の総和と定義する. URL u の Webpage に対する要求比率を p_u とするとき, $P_{(i)}$ と $P_{(d,j)}$ は次式で得られる.

$$P_{(i)} = \sum_{u \in U_x} p_u \quad (4.1)$$

$$P_{(d,j)} = \sum_{u \in U_{(d,j)}} p_u \quad (4.2)$$

各 Webpage の要求比率がパラメータ $\theta = 0.8$ の Zipf 分布に従うことを想定したときの, 要求比率の上位 10 個の TLD および上位 10 個の SLD の要求比率 $P_{(i)}$ と $P_{(d,j)}$ を表 4.2 と表 4.3 にまとめる. TLD で “com” と “net” を有する URL のコンテンツは, 全コンテンツに占める Web ページの要求比率がそれぞれ約 67% と約 15% を占めるため, TLD 単位で 1 つのノードに配置するとノードや周囲のリンクへの負荷集中の発生が予想される. そのため, TLD で “com” を有するコンテンツと “net” を有するコンテンツは SLD 単位に分割してネットワークに再配置する.

表 4.2: 要求比率上位 10 個の TLD

Rank	TLD	$P_{(i)}$	Rank	TLD	$P_{(i)}$
1	com	79.010	6	edu	1.955
2	net	17.938	7	gov	1.873
3	org	5.556	8	co	0.910
4	jp	4.735	9	uk	0.471
5	io	3.348	10	au	0.289

表 4.3: 要求比率上位 10 個の SLD

Rank	SLD	$P_{(d,j)}$	Rank	SLD	$P_{(d,j)}$
1	com/google	11.603	6	com/stackoverflow	2.407
2	com/gstatic	8.089	7	com/highwebmedia	2.053
3	net/openx	7.485	8	io/districtim	1.704
4	com/amazon-adsystem	5.470	9	com/coinmarketcap	1.333
5	net/bidswitch	2.902	10	com/amazon	1.254

4.2 ネットワークトポロジ

本研究では CAIDA で公開されている米国のバックボーンネットワークである図 4.1, 図 4.2 に示す Allegiance Telecom と At Home Network のトポロジを利用した [5]. 図 4.1 は合計ノード数は 53 個あり, 一部のノードが他ノード比べて次数が高い Hub&Spoke 型のネットワークである. また図 4.2 は合計ノード数 46 個で, 各ノードの次数がほとんど等しい Ladder 型のネットワークである. 異なるタイプのトポロジに提案方式を用いることでその有効性の違いも明らかにする.

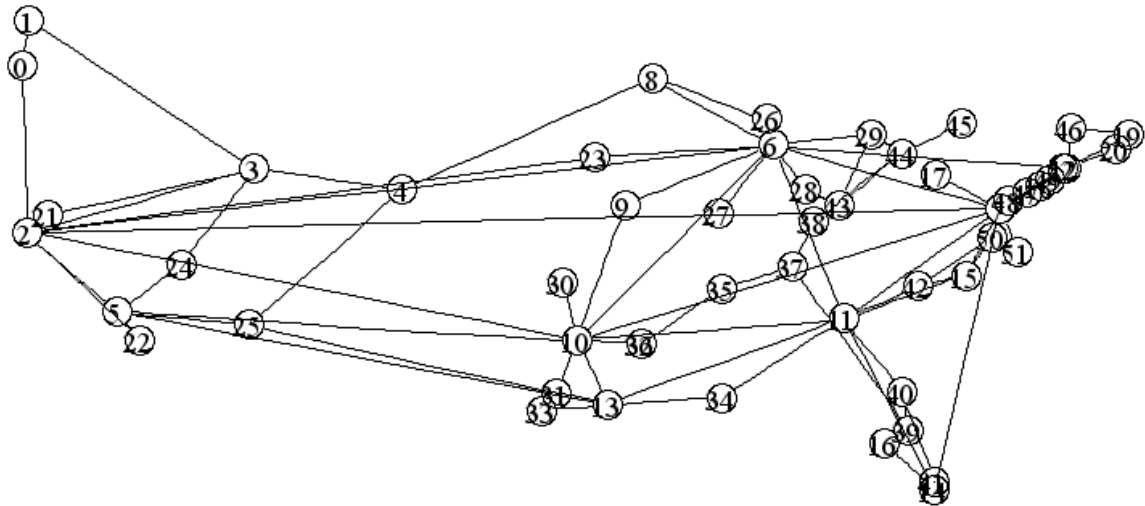


図 4.1: Allegiance Telecom

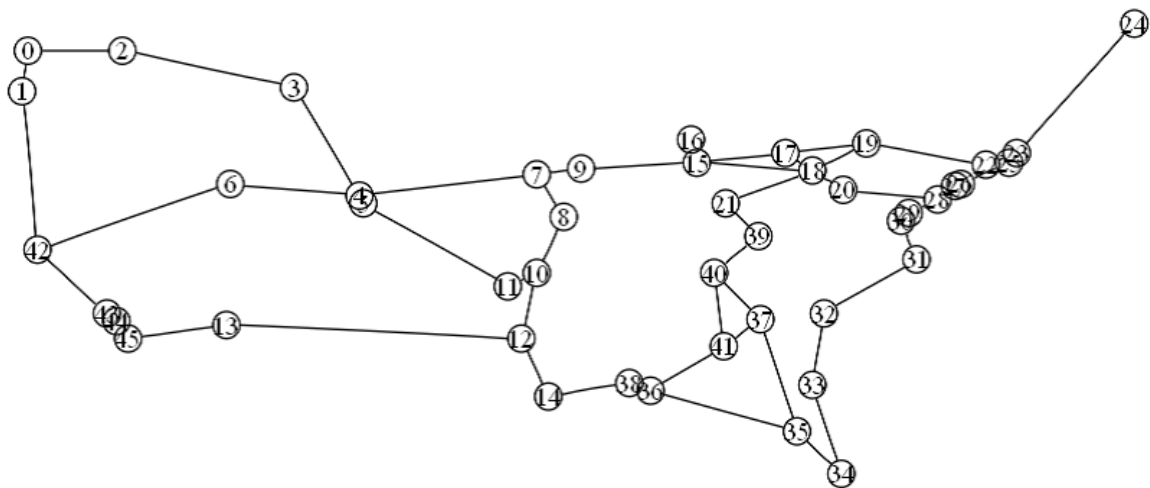


図 4.2: At Home Network

4.3 評価指標

本節では本稿で扱う各評価指標について詳細に説明する。

4.3.1 リンク負荷

ノードから別ノードのコンテンツを要求するとき、経由するリンク l のフローの集合を 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_a は、次式で得られる。

$$L_a = \frac{\sum_{f_{sd} \in F_l} r_p(s) \epsilon(d)}{N_L} \quad (4.3)$$

ただし要求元ノード s の人口比率を $r_p(s)$ 、ノード d に配置されたコンテンツに対する合計要求比率を $\epsilon(d)$ 、リンク数を N_L とし、ノード間リンクは双方向とする。

4.3.2 コンテンツ可用性

コンテンツ x の要求比率 P_x 、ノード n に配置したコンテンツ集合 $U_c(n)$ に対し、ノード n での障害発生時、Interest パケットが転送できず、 $R_c(n) = \sum_{x \in U_c(n)} P_x$ 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。本稿ではコンテンツ可用性喪失値 R_c を単一ノード障害を想定し、以下のように定義する。

$$R_c = \text{MAX } R_c(n) \quad (4.4)$$

4.3.3 ノード負荷

Interest パケットが publisher 宛に送信されるとき、中継ノードでは複数の処理が行われる。具体的にはコンテンツがノード上に存在するときのコンテンツ返送処理、次の転送先ノードを決定するための FIB 探索とエントリ発見時のパケット転送処理が考えられる。本稿では FIB 探索はドメインごとにハッシュ関数を使用して探索を行う想定であるため、FIB エントリ探索にかかる計算量は $O(1)$ と設定される。経由するノード n のフローの集合を F_n 、ノード sd 間のフローを f_{sd} とすると、ここであるノード n に発生するノード負荷が $L_{N(n)}$ で求められるとき、コンテンツ返送処理と Interest パケット転送処理の合計値での合計値でネットワークに発生するノード負荷を L_N が求められる。これらを以下のように定義する。

$$L_{N_n} = \sum_{f_{sd} \in F_n} r_p(s) \epsilon(d) \quad (4.5)$$

$$L_N = \sum_{n \in O} L_{N(n)} \quad (4.6)$$

ただし、ただし要求元ノード s の人口比率を $r_p(s)$ 、ノード d に配置されたコンテンツに対する合計要求比率を $\epsilon(d)$ とし、 O はネットワーク内のノードの数とする。

4.3.4 コンテンツ移動コスト

本研究は静的な配置を想定しているが，オリジナルの再配置時にネットワークに一時的なトラフィック量が発生するため，オリジナルの配信ノード位置と移動コストを考慮する．配置する全コンテンツを対象とし，コンテンツのオリジナルが配置されているノード s から再配置先のノード d までのホップ数 h の合計を移動コスト M_c としすると以下のように定義できる．

$$M_c = \sum_{u \in U_x} h_{sd} \quad (4.7)$$

ただしホップ数はダイクストラ法に基づく最短経路で決定するものとする．

第5章 性能評価

5.1 負荷集中を考慮した GA コンテンツ配置

本節では前節を踏まえて GA を用いて FIB サイズだけでなくネットワークの負荷を考慮して配置する。

5.1.1 設計計画

本提案方式では平均 FIB サイズ (E_a)、リンク負荷の変動係数 (C_L)、コンテンツ可用性喪失値 (R_c)、平均リンク負荷 (L_a) の 4 つの評価指標について基づき評価し、遺伝子 g_i の適応度 $A(g_i)$ として設定する。各世代で各値を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'_a , L'_a , C'_L , R'_c とし、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、以下の式で定義する。4 つの評価尺度があるが、ネットワーク事業者が目的に応じて重みを変更可能である仕様とし、今回は重みを均一に $w = 0.25$ に設定する場合を示す。

$$A(g_i) = w_1(1 - E'_a) + w_2(1 - L'_a) + w_3(1 - C'_L) + w_4(1 - R'_c) \quad (5.1)$$

ランダムに生成された初期集団から開始し、生成した各遺伝子について評価関数に基づいて遺伝子の適応度 $A(g_i)$ を計算する。世代数 $G = 10$ 、初期遺伝子数 $I = 250$ 個に設定し、コンテンツ C のノード位置 n を求める。

5.1.2 評価

本節では提案方式 (Proposed) を CDN を用いてオリジナルの位置を移動させず元来の publisher のオリジンサーバから配信するオリジナル配置 (Original) と、ネットワークの中心から要求度の高いコンテンツをノード数を制限して配置した方式 (Previously Proposed) と比較する。図 5.1, 図 5.2, 図 5.3, 図 5.4 に (a) 平均 FIB サイズ, (b) 平均リンク負荷, (c) リンク負荷の変動係数, (d) コンテンツ可用性喪失値, (e) 最大 FIB サイズ (E_{max}), (f) 最大リンク負荷 (L_{max}), (g) 平均ノード負荷, (h) 最大ノード負荷の 8 つの結果を示す。

提案方式は両トポロジにおいて FIB サイズ低減を実現した。遺伝的アルゴリズムを用いることで FIB サイズが低くなるノード位置に SLD 単位のコンテンツ集合が配置されたことで Previously Proposed よりも低減する結果が得られた。また、負荷分散を考慮した配置によってリンク負荷の変動係数、コンテンツ可用性喪失値、最大リンク負荷、最大ノード負荷の評価指標においても提案方式が最も低下する結果が得られた。提案方式はある単一ノードに配置するコンテンツの合計要求比率が低くなるように遺伝的アルゴリズムによって配置されており、各ノードから発生するコンテンツ要求をネットワーク全体に分散している。そのため、配置場所に制限のある Original や特定ノードにコンテンツをまとめて配置する Previously Proposed より特定ノードや特定リンクに発生する負荷が軽減されている。

一方で、提案方式の平均リンク負荷と平均ノード負荷の値はどちらのトポロジでも増加する結果が得られた。これは負荷分散によってネットワーク全体にコンテンツが分散して配置されたことで、コンテンツ取得にかかる要求パケットのホップ数が増加したためである。そのため、Allegiance Telecom では Original から約 6%, Previously

Proposed から約 44%増加する結果が得られた。At Home Network での平均リンク負荷の値は Original と比較すると低減できる結果が得られたが、Previously Proposed と比較すると増加する結果となった。

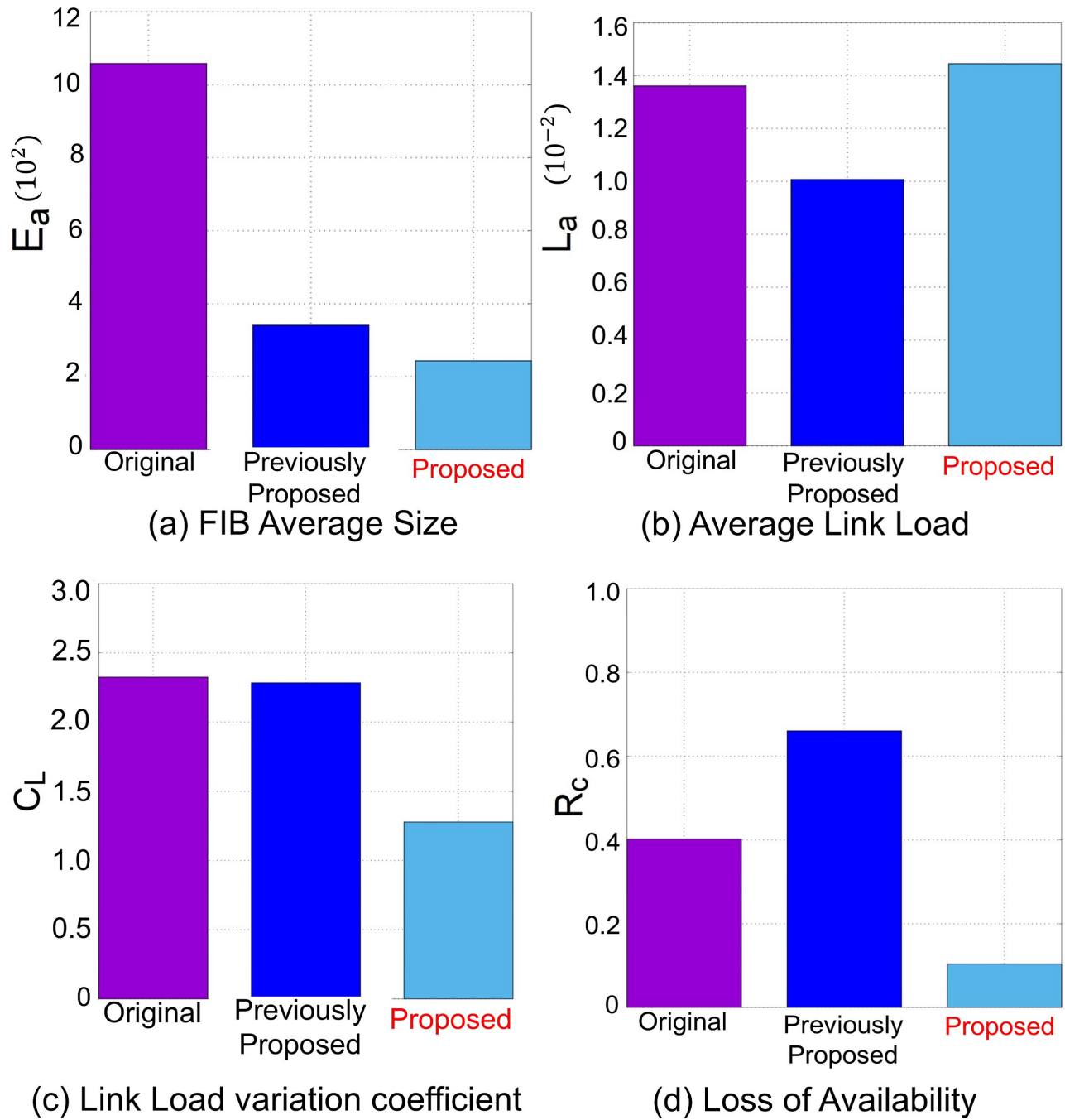
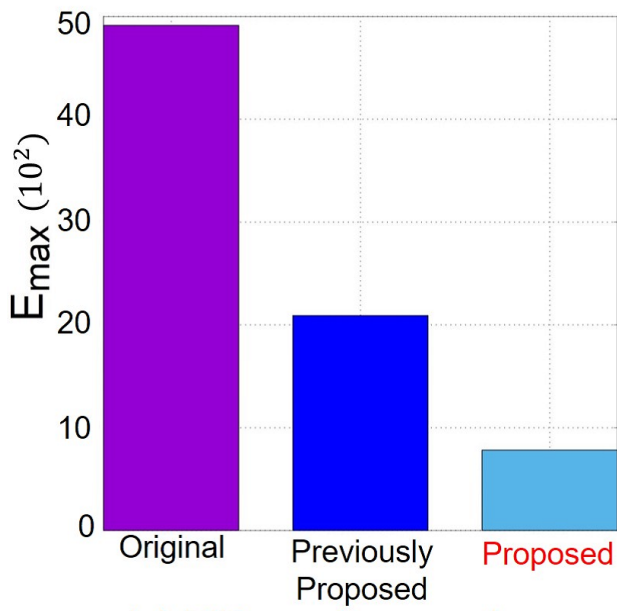
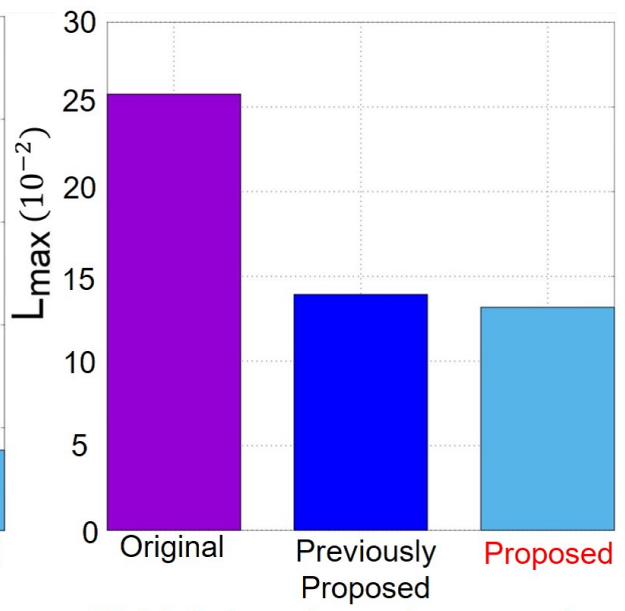


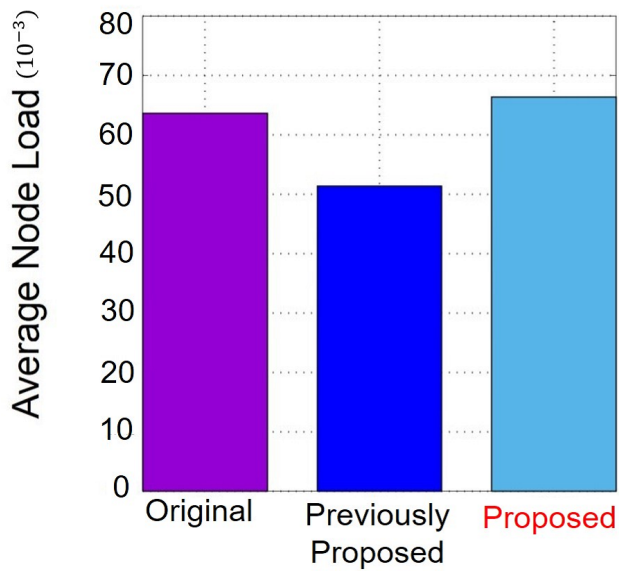
図 5.1: Allegiance Telecom の結果 (1)



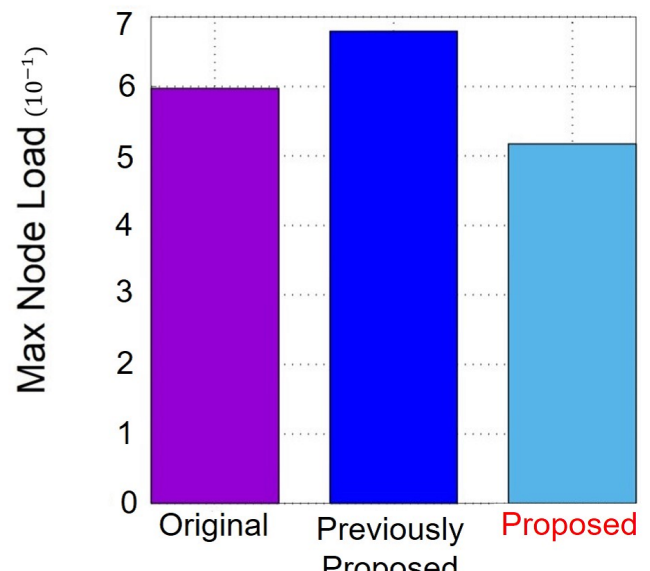
(e) FIB maximum value



(f) Link Load maximum value

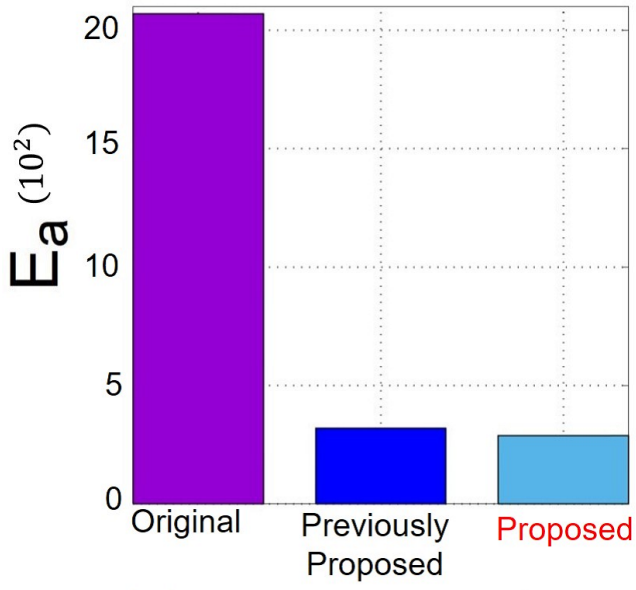


(g) Average Node Load

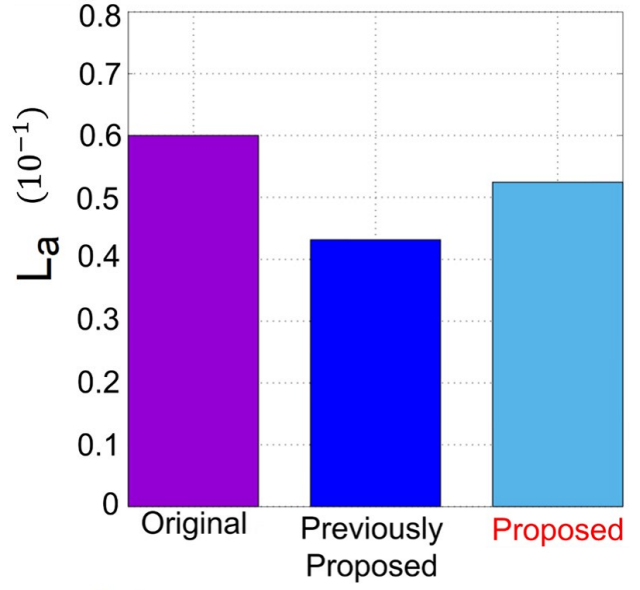


(h) Max Node Load

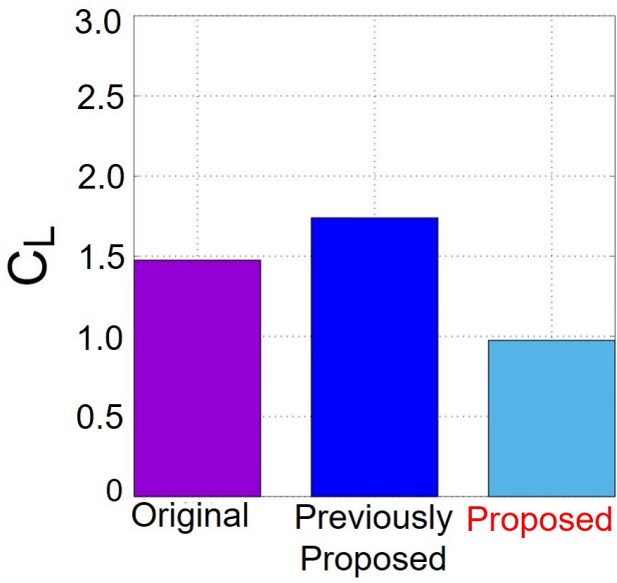
図 5.2: Allegiance Telecom の結果 (2)



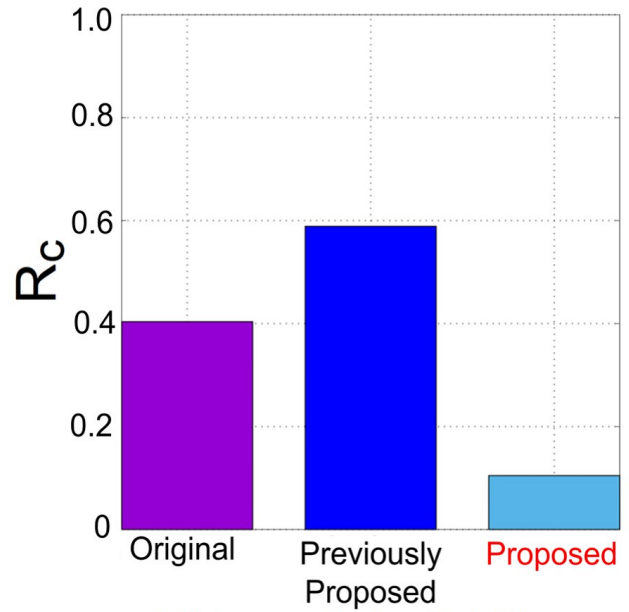
(a) FIB Average Size



(b) Average Link Load

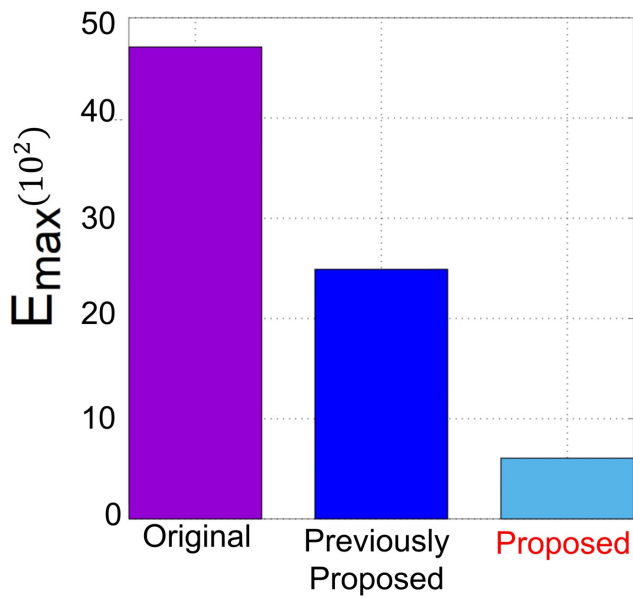


(c) Link Load variation coefficient

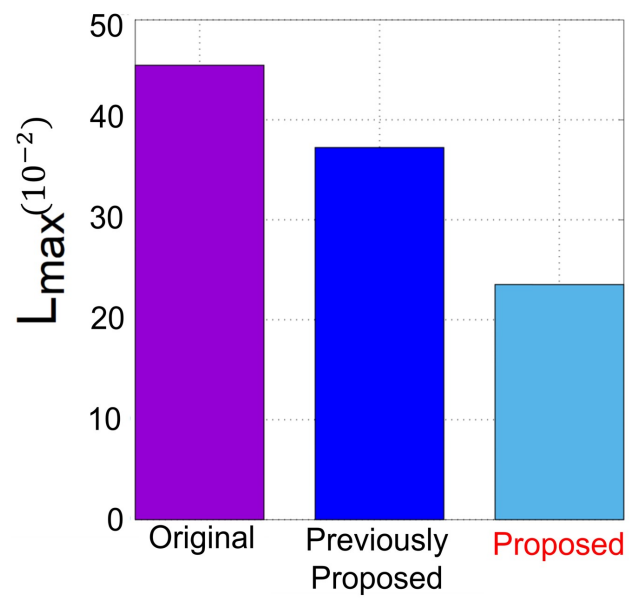


(d) Loss of Availability

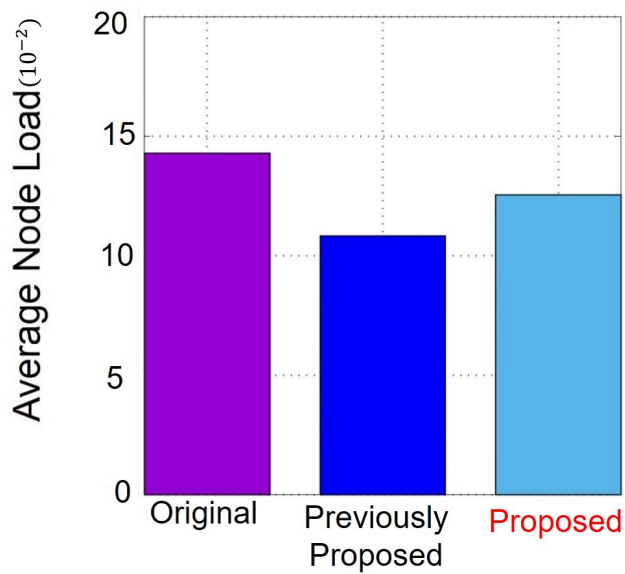
図 5.3: At Home Network の結果 (1)



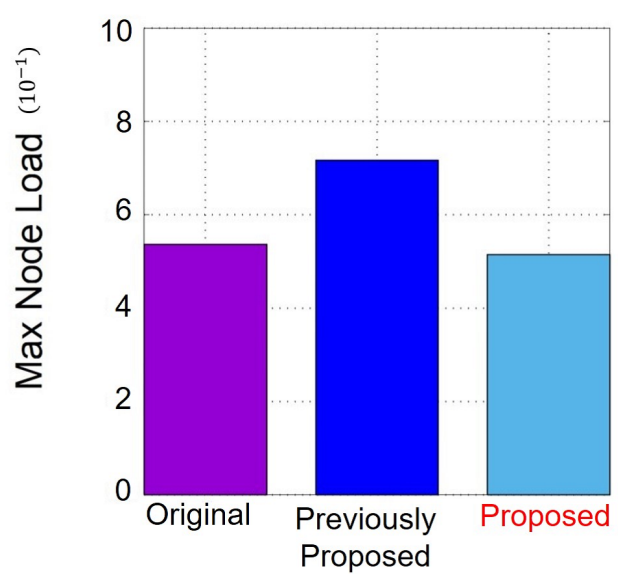
(e) FIB maximum value



(f) Link Load maximum value



(g) Average Node Load



(h) Max Node Load

図 5.4: At Home Network の結果 (2)

5.2 移動コストを考慮した GA のコンテンツ配置

本節では負荷集中に加えて GA を用いてコンテンツ移動コストを考慮して配置する。

5.2.1 設計計画

前節で用いた適用度式 $A(g_i)$ にコンテンツ移動コストの尺度を加える．前節同様に各世代で各値を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， M'_c とし，0～1 の値をとる設定パラメタ w_5 を尺度の重みとし，以下の式で定義する．

$$A(g_i) = w_1(1 - E'_a) + w_2(1 - L'_a) + w_3(1 - C'_L) + w_4(1 - R'_c) + w_5(1 - M'_c) \quad (5.2)$$

世代数や初期遺伝子数についても $G = 10$ ， $I = 250$ 個に設定し，コンテンツ C のノード位置 n を求める．

5.2.2 重みによる影響

前節の結果を踏まえて移動コストの考慮の有無と M_c の重み w_5 の違いが結果に与える影響を明らかにする．

提案方式を 3 つの重み方式で設定し． $w_5 = 0$ でその他の重みが均一に 0.25 に設定されたコンテンツ移動コストの考慮なしに配置する時を (W1)，全ての重みが均一に 0.2 に設定された時 (W2)，移動コストの重みを重視し $w_5 = 0.75$ に設定し， $w_1 = 0.1$ ，その他の重みは 0.05 に設定した時 (W3) を考える．W1 は前節の提案方式によるコンテンツ配置時と同義である．

図 5.5，図 5.6 に両トポロジにおける各配置方式の平均 FIB サイズとコンテンツ移動コストの結果を示す．提案方式では両トポロジにおいて w_5 の重みを大きくすることで移動コストの値は低減する結果が得られた．一方で平均 FIB サイズの値は変化は少なかった．この結果から移動コストを考慮した配置時には w_5 の重みを大きく設定することで FIB サイズを大きくすることなく移動コストを低減可能である．

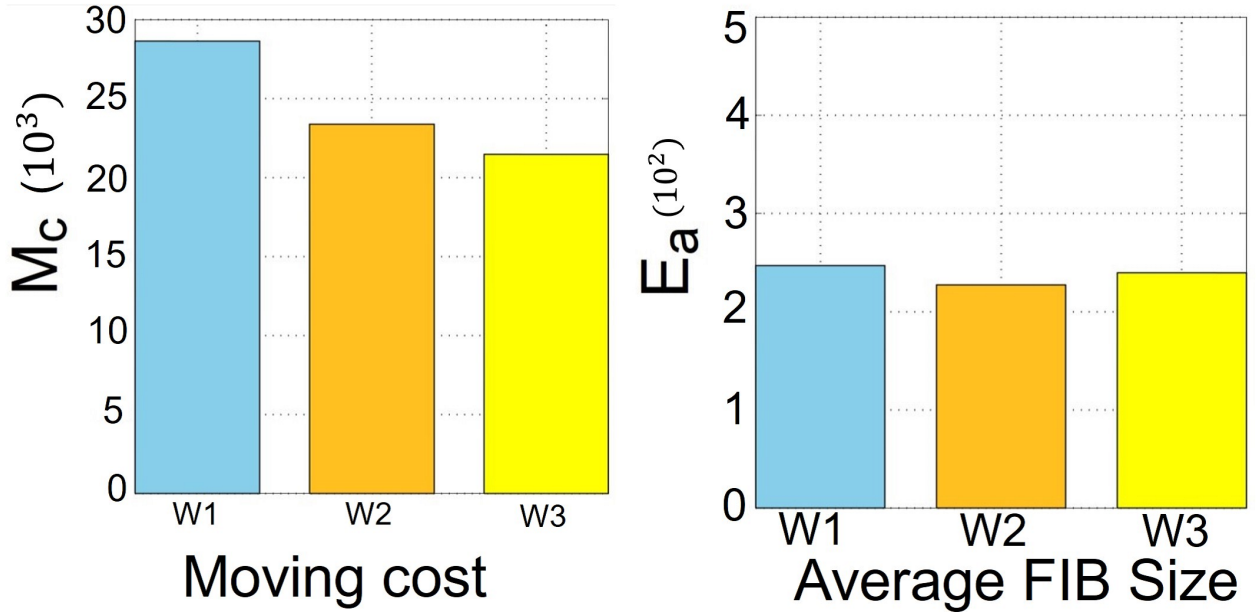


図 5.5: Allegiance Telecom の結果

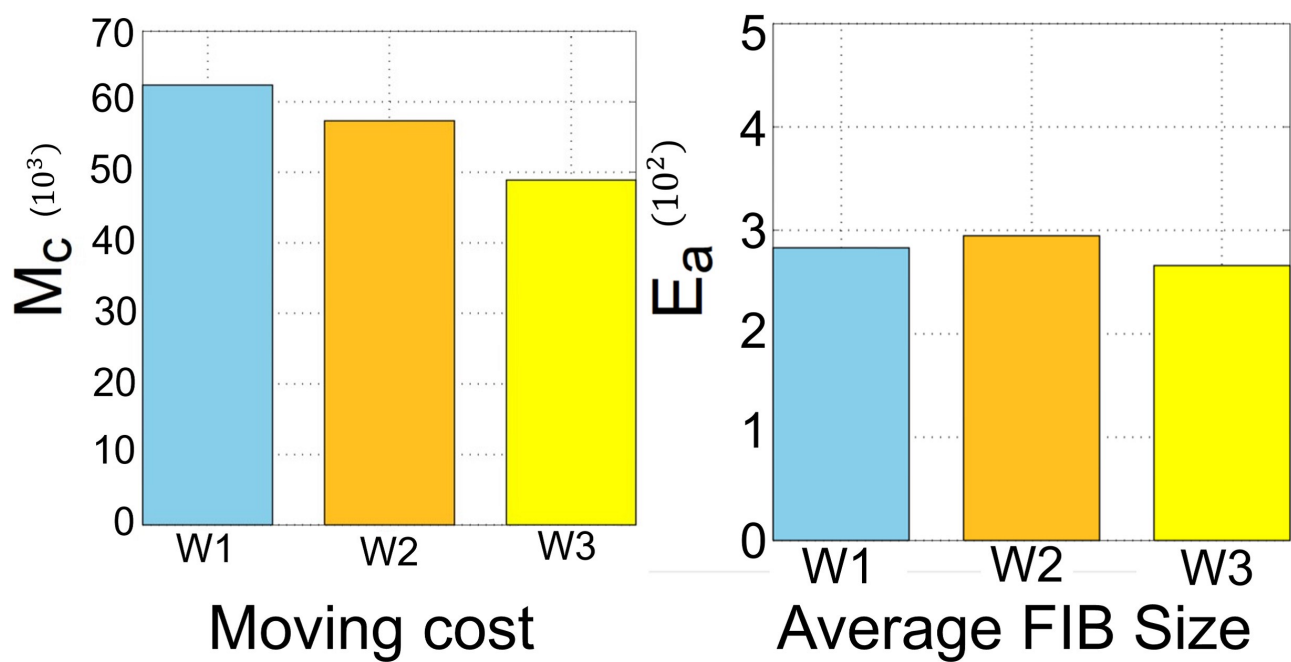


図 5.6: At Home Network の結果

5.2.3 評価

本節ではコンテンツの移動コストを重視した W3 の配置 (Proposed) を前節同様に Original と Previously Proposed と比較する．図 5.7, 図 5.8 に FIB サイズ, 移動コストの結果を示す．提案方式は移動コストを抑えた状態で FIB サイズを大きく低減することが可能である．Original はオリジンサーバから全コンテンツを配信しているため移動コストは発生しないが, FIB サイズの増大が課題である．

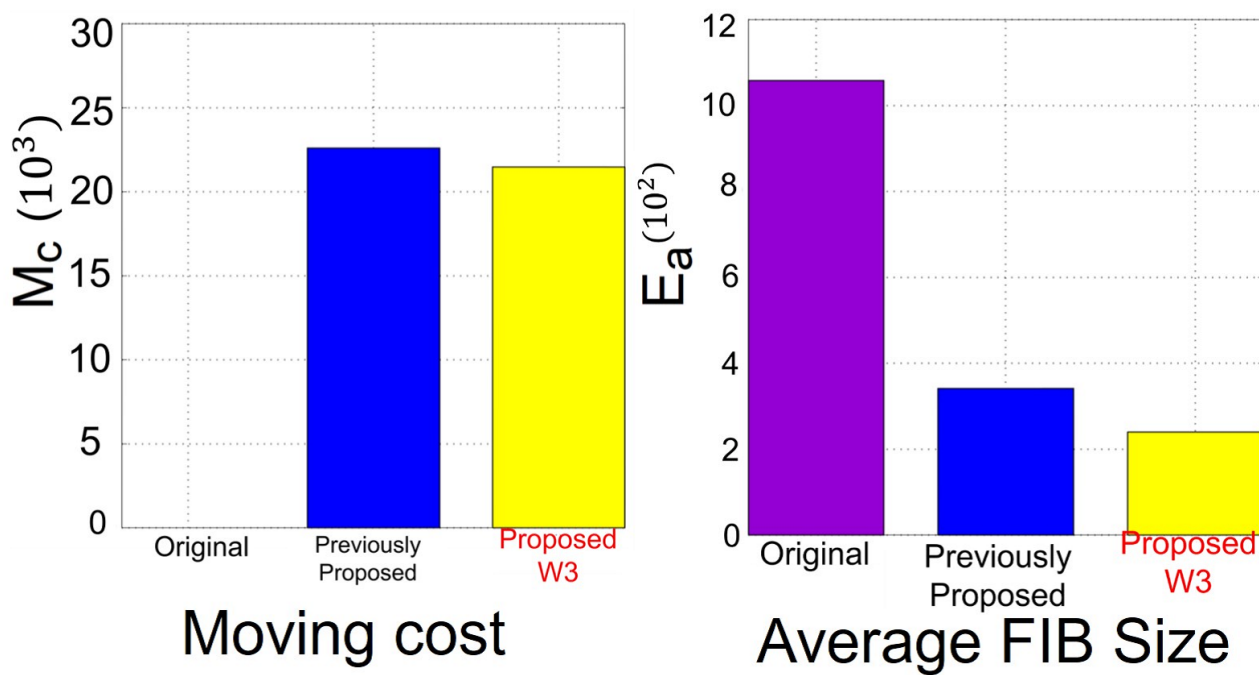


図 5.7: Allegiance Telecom の結果

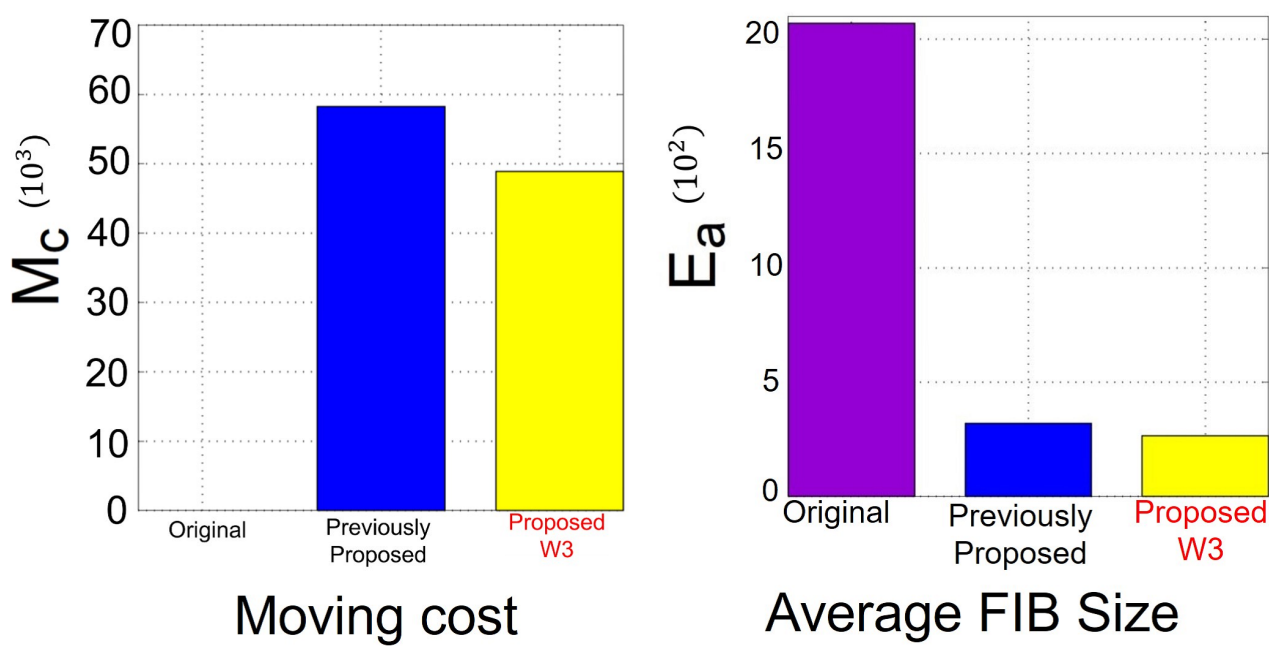


図 5.8: At Home Network の結果

しかし提案方式は Allegiance Telecom と At Home Network でコンテンツ移動コストの削減割合において異なる結果が得られた。表 5.1 に各トポロジにおける 1 コンテンツあたりの平均移動コストを、図 5.9、図 5.10 にオリジンサーバからの各移動コスト値におけるコンテンツの数を示す。

Allegiance Telecom では Previously Proposed と比較して約 5%の削減となり、提案方式の効果はほとんど得られなかった。Hub&Spoke 型は次数が高い Hub ノードを複数もつため、どちらの配置方式においても比較的少ないホップ数でオリジナルを再配置可能である。しかし Proposed では遺伝的アルゴリズムを用い、移動コストを抑えて配置している一方で、負荷分散も同時に行いながら配置しているため、一部コンテンツの配置には高い移動コストが発生する。そのため、表 5.1 に示すように平均移動コストが Previously Proposed と比べてそれほど変わらない結果となり、移動コストの低減率は高くない。

一方で、At Home Network では Previously Proposed と比較してコンテンツ移動コストを約 16%削減した。Ladder 型では各ノードの次数がほとんど等しく、オリジナルの再配置にはコンテンツ移動コストが大きく発生する。Proposed では移動コストの低減に加えて負荷分散も考慮しているため、一部のコンテンツでは高い移動コストが発生するが、遺伝的アルゴリズムによって約半数のコンテンツが移動コスト 4 ホップ以内に抑えて配置されており、負荷分散により発生する一部の高コストコンテンツの影響を低減している。そのため、表 5.1 のように 1 コンテンツあたりの平均移動コストが Previously Proposed と比べて約 1 ホップ低くなっており、移動コストを低減している。

表 5.1: 単位コンテンツあたりの移動コスト

	Previously Proposed	Proposed
Allegiance Telecom	1.881	1.788
At Home Network	4.850	4.070

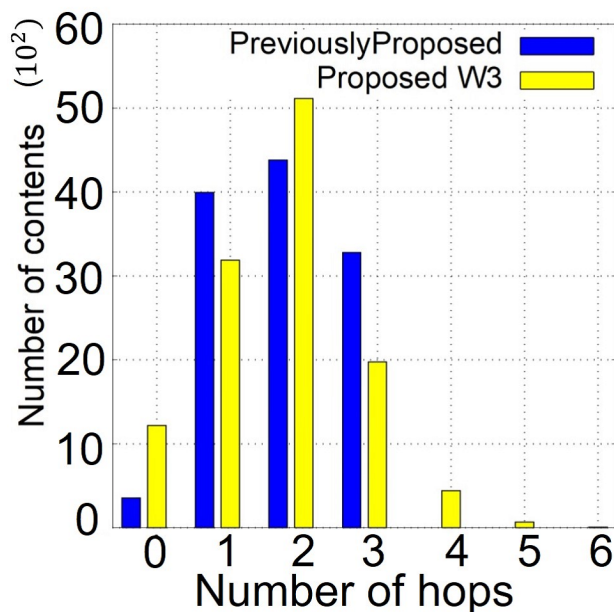


図 5.9: Allegiance Telecom の結果

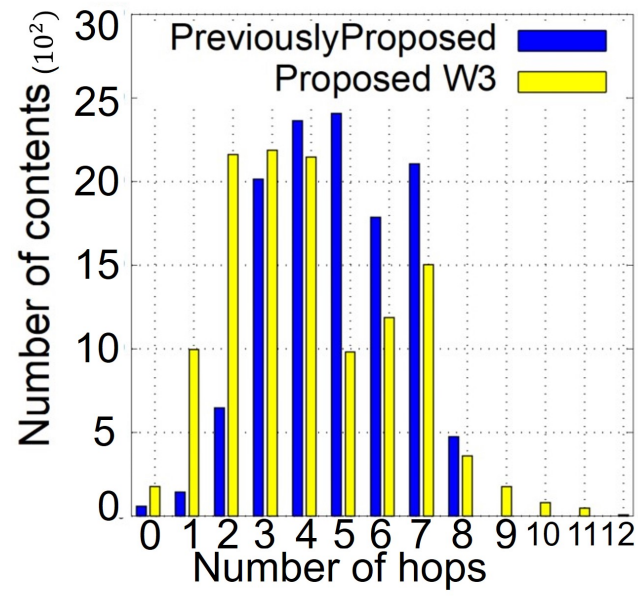


図 5.10: At Home Network の結果

第6章 まとめ

NDN から配信されるコンテンツには地理的な局所性がなく集約が困難であるため、Interest 転送時に参照する FIB エントリ数の低減が困難である。そのため、NDN の実現には効果的な FIB エントリ集約法の開発が求められている。そこで CDN を活用してコンテンツのオリジナルを再配置させ、効果的な FIB 集約が可能となるコンテンツ配置制御法が提案されている。本方式ではこれまでに発見的手法による配置で FIB サイズだけでなく、リンク負荷も低減できることが示されているが、ネットワークの負荷集中の抑制やオリジンサーバからの移動コストの低減については考慮されていない。そのため、それらを考慮した効果的な配置法の検討が課題であるが、ネットワークの多くの要素を踏まえたコンテンツ配置は NP 困難であるため、現実的な時間で良好な解を得ることが難しい。そこで本論文では、近似解の算出に一般的に優れている遺伝的アルゴリズムを用いて、未考慮である負荷集中や移動コストに加えて、FIB サイズや複数のネットワーク性能を向上させるコンテンツ配置法について提案した。

提案方式では発見的手法と比べて平均リンク負荷や平均ノード負荷が増加する。しかし、負荷分散を目的に配置したことでコンテンツ取得に必要なホップ数が増加したため問題ないと考えられる。提案方式は負荷集中を抑えると同時に、FIB サイズの低減を実現できることを2つのトポロジタイプで確認した。また先行研究と比べて、コンテンツ移動コストを抑制しながら配置が可能であることも確認した。本研究は静的な環境を想定していたため、今後は動的な環境を想定したコンテンツ配置の検討が課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導をいただいた上山教授に感謝します．また日常，有益な議論をしていただいた研究室の皆様に感謝します．

参考文献

- [1] A. Afanasyev, C.Yi, L. Wang, B. Zhang, and L. Zhang, SNAMP: Secure Namespace Mapping to Scale NDN Forwarding, IEEE Global Internet Symposium 2015.
- [2] Alexa webpage, <https://www.alexa.com/siteinfo>
- [3] O. Ascigil, S. Rene, I. Psaras, and G. Pavlou, On-Demand Routing for Scalable Name-Based Forwarding, ACM ICN 2018.
- [4] M. Butkiewicz, H. V. Madhyastha, and V. Sekar, Understanding Website Complexity: Measurements, Metrics, and Implications, ACM IMC 2011.
- [5] CAIDA webpage, <http://www.caida.org/data>
- [6] R. Chiochetti, D. Rossi, and G. Carofiglio, Exploit the Known or Explore the Unknown? Hamlet-Like Doubts in ICN, ACM ICN 2012.
- [7] Daishi Kondo, Thomas Ansquer, Yosuke Tanigawa, Hideki Tode, "Resource Breadcrumbs: Discovering Edge Computing Resources Over Named Data Networking", IEEE Transactions on Network and Service Management, vol.21, no.3, pp.3305-3316, 2024.
- [8] 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.
- [9] Hitoshi ASaeda, Kazuhisa MATSUZONO, Yusaku HAYAMIZU, Htet HLAING, and Atsushi OOKA, "A Survey of Information-Centric Networking: The Quest for Innovation", IEICE TRANSACTIONS on Communications, VOL.E107-B, NO.1, pp.139-153 JANUARY 2024
- [10] AKM Mahmudul Hoque, Syed Odaid Amin, Adam Alyyan, and Beichuan Zhang, NLSR: Named-data Link State Routing Protocol, ACM ICN 2013.
- [11] K. V. Katsaros, X. Vasilakos, T. Okwii, G. Xylomenos, G. Pavlou, and G. C. Polyzos, On the Inter-domain Scalability of Route-by-Name Information-Centric Network Architectures, IFIP Networking 2015.
- [12] MaxMind, GeoIP Downloadable Databases, <https://dev.maxmind.com/geoip/legacy/downloadable/>.
- [13] A. Rodrigues, P. Steenkiste, A. Aguiar, Analysis and Improvement of Name-based Packet Forwarding over Flat ID Network Architectures, ACM ICN 2018.
- [14] Y. Sasaki, N. Kamiyama, and Y. Ji., Designing Content Placement of CDN for Improving Aggregation Effect of ICN FIBs, ICOIN 2020.

- [15] T. C. Schmidt, S. Wolke, N. Berg, and M. Wahlisch, Let 'sCollect Names: How PANINI Limits FIB Tables in Name Based Routing, IFIP Networking 2016.
- [16] Shahab Safaee, Abolfazl, and Torghi Haghighat, "Replica placement using genetic algorithm", 2012 International Conference on Innovation Management and Technology Research.
- [17] W. So, A. Narayanan, and D. Oran, Named data networking on a router: Fast and DoS-resistant forwarding with hash tables, ACM/IEEE ANCS 2013.
- [18] Software is hard, <http://www.softwareishard.com/blog/harviewer/>
- [19] G. Xylomenos, C. N. Ververidis, V.A. Siris, N. Fotiou, C. Tsilopoulos, X. Vasilakos, K. V. Katsaros, and G. C. Polyzos, A Survey of Information-Centric Net-working Research, IEEE Communications Survey and Tu-torials, Vol. 16, No. 2, pp.1024-1049, 2014.
- [20] L. Zhang, D. Estrin, J. Burke, V. Jacobson, J. D. Thornton, D. K. Smetters, B. Zhang, G. Tsudik, k. claffy, D. Krioukov, D. Massey, C. Papadopoulos, T. Abdelzaher, L. Wang, P. Crowley, and E. Yeh, Named Data Networking (NDN) Project, Technical Report NDN-0001, Oct. 2010.

外部発表文献

- [1] 橋本紘輝, 上山憲昭, NDN の FIB 左図低減とリンク負荷抑制を目的としたコンテンツの最適配置, 電子情報通信学会第 23 回 ICN 研究会, 東京新宿, 2023 年 5 月
- [2] 橋本紘輝, 上山憲昭, 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の評価, 電子情報通信学会ソサエティ大会 2023 年, B-6-6, 名古屋, 2023 年 9 月
- [3] 橋本紘輝, 上山憲昭, NDN のコンテンツ配置法への遺伝的アルゴリズムの適用, 電子情報通信学会第 27 回 ICN 研究会ワークショップ, 北海道, 2024 年 8 月
- [4] 橋本紘輝, 上山憲昭, 遺伝的アルゴリズムを用いた NDN のコンテンツ配置法, 電子情報通信学会ソサエティ大会 2024 年, N-2-02, 埼玉, 2024 年 9 月
- [5] Hiroki Hashimoto, Noriaki Kamiyama, Content Placement for Reducing FIB Size in NDN Using GA, the 2025 IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN),, Chiang Mai, Thailand, 2025 年 1 月
- [6] 橋本紘輝, 上山憲昭, NDN の遺伝的アルゴリズムを用いたコンテンツ配置の評価, 電子情報通信学会 ネットワークシステム (NS) 研究会, 2025 年 3 月