

令和5年度 修士論文

Named Data Networkingにおけるキャッシュとルーティング
ダプロトコルを利用したコンテンツモビリティサポート

CONTENTS MOBILITY SUPPORT EXPLOITING
CACHING AND ROUTING PROTOCOL IN NAMED
DATA NETWORKING

指導教授 中里秀則 教授

2024年1月22日

早稲田大学 基幹理工学研究科 情報理工・情報通信専攻
分散コンピューティングシステム研究

5122F086

御法川凌太

Ryota Minorikawa

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本論文の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	関連技術	3
2.1	NDN	3
2.1.1	アーキテクチャ	3
2.1.2	転送プロセス	3
2.2	NLSR	5
2.2.1	アーキテクチャ	5
2.2.2	パケット	5
2.3	NFD	5
2.4	ndn-cxx	6
2.5	PSync	6
2.6	ndn-tools	6
第 3 章	関連研究	7
3.1	概要	7
3.2	Indirection アプローチ	7
3.3	Routing-based アプローチ	7
第 4 章	提案手法	9
4.1	概要	9
4.2	実装	9
第 5 章	実験	11
5.1	概要	11
5.2	環境	11
5.3	実験 1	11
5.4	実験 2	13
5.5	実験 3	16
5.6	実験 4	23
5.7	評価	25
第 6 章	結論	27
6.1	まとめ	27
6.2	展望	27

第1章 序論

1.1 背景

コンテンツ名を用いて通信を行う Information Centric Networking (ICN) [15] は、コンテンツを重要視したプロトコルであり、コンテンツの位置に関わらずコンテンツ名でコンテンツ要求を行う。パケット転送に名前のみを用いる特性から、DNS のようなコンテンツ要求時のアドレス解決を必要としない。また、ICN のルータはコンテンツのキャッシュ機能を持つため、要求率が高い人気のコンテンツをユーザの近くから提供可能である。そのため、現在主流な IP アドレスを用いて通信を行う Host Centric Networking (HCN) のようなアドレスの位置とアドレス解決機器に依存した通信で発生する、移動後のユーザが行う要求コンテンツに対するアドレスの再解決やコンテンツ提供サーバへの再接続に起因する応答速度の低下やアドレス解決機器への負荷、特定のコンテンツに対して要求が集中する現状の需要に起因する帯域占有の問題解決に期待されている。ユーザの需要はコンテンツの場所ではなくコンテンツそのものであり、HCN では IP アドレスの変更や、IP 以外のレイヤにユーザの移動情報通知や移動先へのコンテンツ転送機能を追加をすることでモビリティに関する問題を解決しているが、ICN はユーザがコンテンツの位置情報に依存せずコンテンツを要求可能であり、ルータのキャッシュ機能によるコンテンツ要求のサポートも可能なプロトコルであるため、他レイヤでの機能追加が不要である。ICN の中でも研究が盛んなプロトコルとして NDN (Named Data Networking) [7] が挙げられる。

1.2 本論文の目的

NDN ルータは要求への応答として転送するコンテンツのキャッシュ機能や、未応答の要求情報を保持し後続の要求とまとめる機能を持っている。これにより、コンテンツ要求者であるコンシューマが移動した際に、コンテンツ提供者であるプロデューサとの接続を貼り直すことなくコンテンツを要求することや、移動時に他の要求情報を元にしたコンテンツ要求が可能となっている。

しかし、プロデューサやコンテンツの移動時はコンテンツが元の場所から消えるため、誤った経路へのパケット転送を防ぐために今まで提供していたコンテンツの経路情報を取り下げる必要がある。ルーティングテーブルからコンテンツ情報が消えるため、ネットワーク内のコンシューマからコンテンツへの到達性が無くなり、再度移動先からコンテンツへの経路情報が発信されるまでの間コンテンツ提供が出来ない点が懸念されている。これには様々な解決手法が提案されているが、解決に特殊なノードを必要とし、それがパフォーマンスのボトルネックになる問題や、移動直後のコンテンツ要求に対応できない問題などが存在する。

そのため、NDN ルータがキャッシュしたコンテンツ情報をルーティングプロトコルの機能でネットワークに対して広告し、コンテンツの移動時にもキャッシュに向けたコンテンツ要求を可能とすることでコンテンツ提供を行える手法を提案し、従来環境と比較することで有効性を検証する。また、様々な条件に適用することで提案手法の有効範囲を測定する。

1.3 本論文の構成

本論文では、NDN に関わる関連技術やコンテンツモビリティサポートの関連研究について紹介し、提案手法の説明と複数の実験結果の評価を行い、最後にまとめる。

第2章 関連技術

2.1 NDN

2.1.1 アーキテクチャ

NDN とは ICN の一種であり，階層的で可読性のある名前をパケット転送に用いるプロトコルである．ユーザによるコンテンツ要求に Interest パケット，それに対するサーバによる応答に Data パケットを使用する．これらのパケットは後述するデータ構造により，転送するルータがパケット内容の一部を保持することで後続の要求解決をサポート可能となっている．図 2.1 にこれらのパケットフォーマットを示す．

Interest パケットには，Name, Selectors, Nonce, Guiders フィールドが存在する．Name フィールドには Interest パケットで要求する階層的な形式を取ったコンテンツ名が含まれる．Selectors フィールドには要求データのバージョンやフラグメント指定などコンテンツ選択の補助情報が含まれる．Nonce フィールドにはループ検出や重複防止用の Interest パケットの識別情報であるランダム値が含まれる．Guiders フィールドには Interest パケットのライフタイムなど転送時に追加で使用する情報が含まれる．

Data パケットには，Name, MetaInfo, Content, Signature フィールドが存在する．Name フィールドには，Interest パケットで要求され，当該 Data パケットで応答するコンテンツ名が含まれる．MetaInfo フィールドにはコンテンツの追加情報が含まれる．Content フィールドには要求されたコンテンツの本体が含まれる．Signature フィールドにはデータの信頼性を担保する Data パケットの署名情報が含まれる．

どちらのパケットにもコンテンツ名を示す Name フィールドが存在し，この情報を元にパケットの転送が行われる．NDN ルータは Data パケットのキャッシュ機能があるため，Data パケットの転送時，自信のキャッシュポリシーに応じてコンテンツをキャッシュする．キャッシュ済みのコンテンツに対する Interest パケットにはキャッシュ済みの Data パケットで応答し，以降の転送を必要としないため，コンシューマは近くから素早くコンテンツを取得可能である．

2.1.2 転送プロセス

NDN のパケット転送は，Forwarding Information Base (FIB), Pending Interest Table (PIT), Content Store (CS) の 3 種類のデータ構造を用いて行われる．FIB は，ルーティングプロトコルで集めたネットワークの経路情報を元に作成された Routing Information Base (RIB) の中から最適な経路のみを集めたデータ構造であり，Interest パケットの Name フィールドに記載されたコンテンツ名から FIB 内で最長一致するコンテンツ名を求め，転送先インターフェースを決定する．PIT は，Interest パケットで要求しているコンテンツ名とルータが Interest パケットを受信したインターフェースの関係を対応付けたデータ構造であり，転送した Interest パケットに返答が来るまで情報を保持する．これにより，応答前の同一コンテンツへ新たな要求が行われた場合，PIT に対応を書き加え Interest パケットを破棄し，以前の要求解決時にまとめて応答を返すことで，コンテンツまでの帯域占有率を削減する．CS は，受信した Data パケットのコンテンツをキャッシュするデータ構造であり，Data パケットの受信時にキャッシュポリシーに従いコンテンツをキャッシュする．キャッシュさ

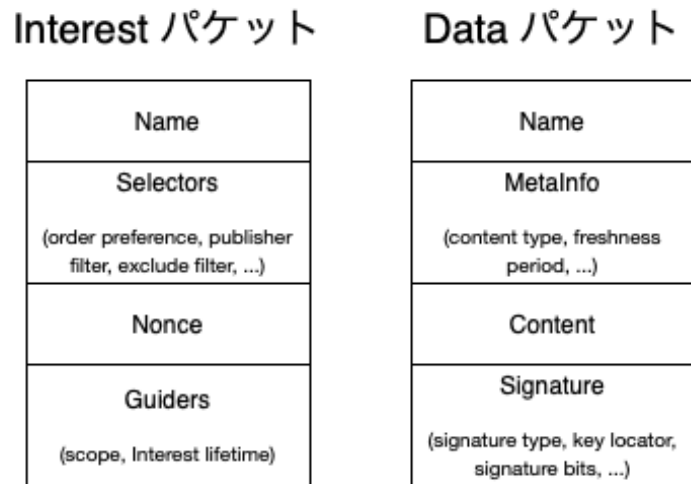


図 2.1: NDN パケットのフォーマット

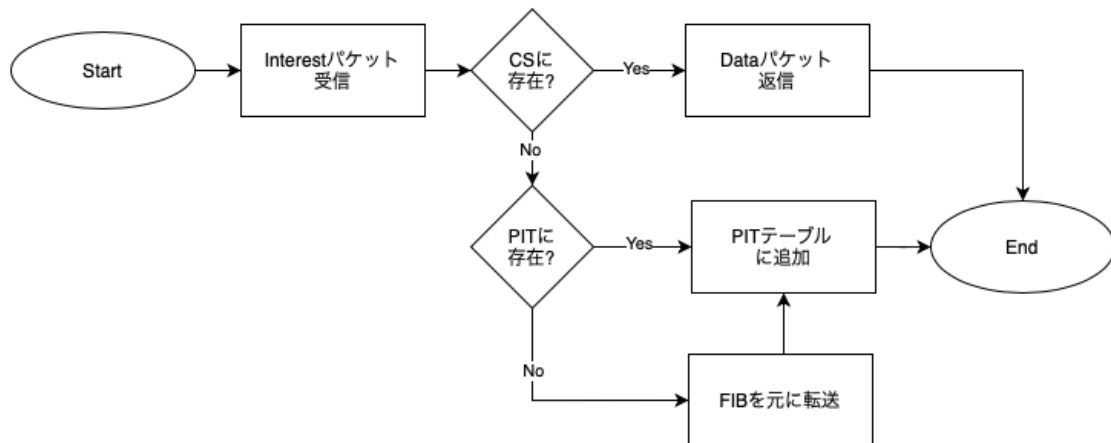


図 2.2: Interest パケット受信時の NDN ルータの動作

れたコンテンツは、キャッシュリプレイスメントポリシーによって破棄されるまで保持されるため、これらのコンテンツに対する要求は、以降の転送を必要とせず高速に応答可能である。

3種類のデータ構造を用いた転送プロセスを図 2.2 に示す。Interest パケットが NDN ルータに到着した際、同一の Name フィールドを持つ Data パケットが CS に存在するかを確認する。存在した場合は Data パケットを Interest パケットを受信したインターフェースに対して送信するが、存在しなかった場合は同一の Name フィールドが PIT に存在するかを確認する。存在した場合は、受信したインターフェース情報をその PIT に書き加え、Interest パケットを破棄し、以前の要求が解決するのを待機するが、存在しなかった場合は FIB の情報を元に Interest パケットを転送し、PIT にコンテンツ名とインターフェースの関係を書き加える。また、全ての場合において Data パケットは Interest パケットの逆順で転送される。これは、PIT に記載された受信インターフェースを遡る事で消費者に到達するためである。

表 2.1: NLSR のパケット分類

NLSR パケット	OSPF パケット	概要
Info Interest	Hello	ネイバーの死活監視
Info Reply	Hello	ネイバーの死活監視
LSA Interest	Link State Request	LSA の要求
LSA Data	Link State Update	LSA の更新
Sync Interest	Database Description	LSDB の整合性確認
Sync Data	Database Description	LSDB の整合性確認

2.2 NLSR

2.2.1 アーキテクチャ

Named-data Link State Routing Protocol (NLSR) [5] とは NDN で使用されるルーティングプロトコルである。Open Shortest Path First (OSPF) などと同じリンクステート型であるため、同一ネットワーク内のルータとネイバーと呼ばれる経路情報を定期的に交換する関係を築くことで全てのルータがネットワーク全体の経路情報を共有する。NDN ルータは自身の各インターフェースのアップダウンや帯域幅、コストの情報などをまとめた Link State Advertisement (LSA) を作成し、ネイバーに送信することで LSA の集まりである Link State Database (LSDB) を同期する。この LSDB を元に Shortest Path First アルゴリズムを実行することで宛先への経路を決定し、ルーティングを行う。NLSR による通信は NDN と同様に Interest, Data パケットを使用するが、通信チャンネルに Ethernet, IP, TCP/UDP など様々なプロトコルを利用可能である。

2.2.2 パケット

NLSR は様々なパケットを用いて実現されている。表 2.1 に OSPF と比較した NLSR のパケット分類と概要を示す。

Info Interest パケットと Info Reply パケットは、OSPF の Hello パケットと同じくネイバー関係の確立や、ネイバーの死活監視に使用される。通常 Info Interest パケットは定期的送信され、その応答として Info Reply パケットが返されるが、応答が無い場合はパケットが途中で損失したと考え短期間に複数回再送する。一定の期間応答が無い場合はネイバーがダウンしたと考え、他ネイバーを経由する経路の再計算を行う。

LSA Interest パケットは OSPF の Link State Request パケットと同じくネイバーとの LSDB に差異が生じた際の LSA Data パケット要求に使用される。LSA Data パケットは OSPF の LSA Update パケットと同じくネイバーに対する LSA 通知に使用される。全ルータが LSA を送り合うことで LSDB がネットワーク全体で同期され、同一の経路情報を保持できる。

Sync Interest パケットと Sync Data パケットは、OSPF の Database Description パケットと同じく LSDB の同期に使用される。Sync Interest パケットにより定期的に LSDB の hash 値を伝え、ネイバー間で値が異なる場合は Sync Data パケットによって不足している経路情報を通知する。不足情報は LSA Interest パケットを転送することで LSA Data パケットを要求し、経路情報の差異を解消する。

2.3 NFD

NDN Forwarding Daemon (NFD) [10] とは NDN においてコンテンツ名を用いたデータ転送やルーティングをサポートするプログラムである。Interest パケットや Data パケットの転送プロセス

に使用される FIB, PIT, CS のデータ構造や, それらを用いたパケット処理についての実装が行われており, RIB やネットワークインターフェースも管理する.

2.4 ndn-cxx

NDN C++ library with eXperimental eXtensions (ndn-cxx) [9] とは NDN 上で NDN アプリケーションを動作させるための通信機能やパケット転送機能などを提供するためのライブラリである. NLSR や NFD, ndn-tools はこのライブラリを用いて動作している.

2.5 PSync

PSync [16] とは NDN で使用される同期プロトコルである. 同期プロトコルとして Chronosync [18] や iSync [4] も存在するが, これらは全てのノードが全てのデータを同期するフルデータ同期しかサポートしていない. PSync は任意のノードが特定の名前空間のデータのみを選択して同期する部分データ同期をサポートしているため, Publish/Sbscribe モデルアプリケーションへの対応や効率的なデータ同期が可能となる. また, 最新のデータ名を Invertible Bloom Filters (IBF) [2] で表しているため, 新規データとの差を効率的に発見可能となっている.

2.6 ndn-tools

ndn-tools とは NDN における解析用のテストツールである. Interest パケットによるコンシューマからのコンテンツ要求を ndnpeek で, Data パケットによるプロデューサからのコンテンツ提供を ndnpoke で行うことでネットワーク内の疎通性を確認する. ndnpeek とはネットワーク内で提供されている任意のコンテンツを要求する機能であり, コンテンツが応答可能であれば Data パケットが, 途中で転送不可能なノードがあれば Nack パケットが返される. ndnpoke とは任意のコンテンツを ndnpeek によるコンテンツ要求が行われるまで提供する機能である. また, キャッシュ機能が有効化された NDN ルータはこの提供コンテンツをキャッシュ可能である.

他のツールとして, NDN パケットのフォーマットを解析する dissect-wireshark が存在する. ここで提供される ndn.lua を Wireshark に読み込ませることで Interest パケットや Data パケットなど NDN 特有のパケットを分析可能となっている.

第3章 関連研究

3.1 概要

NDNにおけるコンテンツモビリティサポートは様々な手法 [3] が提案されており、これらは主に Indirection アプローチと Routing-based アプローチに分類される。

3.2 Indirection アプローチ

Indirection アプローチとはアンカーと呼ばれるネットワーク内に存在する全てのコンテンツに関する経路情報を一元管理する特殊なルータを用意し、コンシューマによる全てのコンテンツ要求をこのルータを経由して行うことで移動を管理する手法である。コンテンツが移動する場合、プロデューサはその移動情報をアンカーに通知し、アンカーは位置情報管理システムを用いてコンテンツの名前と移動先の場所を合致させる。そのため、コンシューマはアンカーに対して Interest パケットを送信するところで、移動情報を気にすることなくコンテンツを取得可能である。この手法の利点は、アンカーがネットワーク内の全コンテンツの位置情報を持つため、ハンドオフ遅延が短い点や、コンテンツの移動に関わらず転送経路が変化しないため、転送時間が一定である点が挙げられる。しかし、欠点としてアンカーに機能が集約しているためパフォーマンスのボトルネックとなる恐れがある点や、アンカーを経由しコンテンツを検索するため直接コンテンツに到達する場合より平均 Round Trip Time (RTT) が増える可能性がある点が挙げられる。

このアプローチを用いた手法の一つである Kite [17] は、移動先のプロデューサがアンカーに対して移動情報を通知し、アンカーとプロデューサの間にある全ルータで移動先への転送経路を示すルートキャッシュを作成することでコンテンツの位置を知らせる。これにより、コンシューマはアンカーとこれらのルータを経由して移動後のコンテンツへアクセス可能となる。しかし、この手法はネットワーク内のルータが移動先への経路情報をキャッシュする機能追加の必要があるため、ネットワーク管理の複雑さとルータへのコストが増大する。そのため、この手法は全てのシナリオで適用できるとは限らない。また、ルータのキャッシュを多く利用する手法は他の情報でキャッシュが上書きされる危険があり、複数の異なるコンテンツ要求時に失敗する可能性がある。

3.3 Routing-based アプローチ

Routing-based アプローチとはコンテンツの移動情報をプロデューサがネットワークに通知し経路情報を更新することで移動を管理する手法である。この手法の利点は、コンテンツの移動時にコンテンツ名を変更する必要がないため、移動前後の名前を合致させる必要が無い点や、アンカーの様な特殊なルータを用意する必要が無い点が挙げられる。しかし、欠点としてコンテンツが移動した場合はルーティングテーブルの収束を待つ必要があり、移動直後の要求には応答できないなど、リアルタイム性に欠ける点が挙げられる。

このアプローチを用いた手法の一つ [1] は、ハンドオフの少し前に移動元のプロデューサが移動先のプロデューサに対してハンドオーバー通知を送信する。この通知にはプロデューサの ID やプレフィックス情報が含まれているため、移動後の素早いプロデューサ登録が可能となり、ハンドオフ時のパケットロスが少なくなる。しかし、この手法はプロデューサがハンドオフのタイミングを事前に知る

必要や、移動前後の経路にあるルータへプロデューサ同士の情報交換に対応する仕組みを導入する必要がある。

第4章 提案手法

4.1 概要

コンテンツが移動する際、プロデューサはコンテンツ要求が移動元の誤った経路に転送される問題を防ぐため、コンテンツの広告を取りやめることで、ネットワークのルーティングテーブルから該当するコンテンツ情報を削除する。そのため、コンテンツが移動し、移動先での新たな経路情報の広告がルーティングプロトコルによりコンシューマへ伝搬完了するまでの間、コンテンツは一時的に提供不可能となる。経路情報が存在しないためキャッシュ済みのコンテンツへも要求が到達せず、NDNの機能を有効活用できない。そこで、NDN ルータが持つコンテンツのキャッシュ機能と NLSR の経路広告機能を用いた解決方法を提案する。

本手法は、NDN ルータが移動する可能性があるコンテンツ (Move Contents) を CS にキャッシュした際、Data パケットのコンテンツ名を用いて NLSR によるネットワークへのコンテンツ広告を行う。通常キャッシュ情報はルータ外部に通知されないためネットワークに影響を与えないが、CS によるコンテンツの保持と、NLSR による広告でコンテンツ提供を可能とすることで NDN ルータを擬似的なプロデューサとして動作可能としている。これにより、コンテンツ移動時も移動先での広告経路の収束を待たずにコンテンツの提供が可能となる。また、提案手法を導入したルータにおいて Move Contents がキャッシュクリアされる場合、NLSR による広告の取り止めを行うことで、該当キャッシュが存在しないルータに向けたコンテンツ要求が行われなくなる。Move Contents は、Data パケットに Flag を追加することで識別する。コンテンツ名の変更は他ルータに影響を与える懸念があるが、Flag であれば無視できるためネットワーク内の他のルータに負荷をかけず導入可能である。NDN のキャッシュポリシーは様々な種類が存在するが、本手法はポリシーと無関係に動作するため、本稿では最も一般的な Cache Everything Everywhere (CEE) を使用する。さらに、CS などのデータ構造は Move Contents を他のコンテンツと同様に管理する。

本手法はリアルタイム性に欠ける傾向のある Routing-based アプローチに分類されるが、コンテンツの移動前に行われるキャッシュに対応して広告されるため、移動後の経路広告遅延を気にする必要がない。そのため、従来の方法とは異なり移動中のコンテンツに対する要求を解決可能である。

図 4.1 に提案手法の概要を示す。提案手法を適用した NDN ルータ (R4) が Move Contents を転送した際にコンテンツをキャッシュし、NLSR で広告する。これにより、コンテンツの移動後もキャッシュ済みのコンテンツを提供可能となるため、移動直後のコンテンツ要求にも対応できる。

4.2 実装

本手法は Move Contents を要求する Interest パケットを受信した際に、プロデューサが Move Flag を取り付けた Data パケットを返信し、そのパケットが NDN ルータの CS でキャッシュ/キャッシュクリアされた場合に動作する。どちらの場合においても、NLSR による広告/広告削除でネットワーク内の LSDB を更新し、FIB に反映することで経路情報を変更する。

提案手法において NDN ルータは、Move Flag のついたコンテンツのキャッシュ時に NLSR による広告を行う。NLSR は、ルータの LSDB にコンテンツ情報を追加した後、ネイバーに LSA Data パケットを送信することでコンテンツ広告を行う。ネイバーは、受信した LSA Data パケットから自身の LSDB を更新することで経路情報の同期を行う。これにより、移動に関わらず事前にコンテンツの提供が可能となる。図 4.2 に提案手法によるコンテンツ広告時の動作を示す。

第5章 実験

5.1 概要

提案手法検証のため4種類の実験を行った。実験1では、提案手法を適用しない場合、プロデューサと直接接続されたNDNルータにのみ提案手法を適用した場合、全NDNルータに提案手法を適用した場合についての性能評価を行った。実験2では、様々なトポロジにおいて提案手法を適用した場合についての性能評価を行った。実験3では、実験2の条件においてプロデューサが提供するコンテンツ数を変更した場合の変化を評価した。実験4では、ノードやコンテンツ増加への対応のため、ネットワークを分割した際の効果を評価した。

どの実験においてもコンテンツ要求に `ndnpeek`、コンテンツ提供に `ndnpoke` を使用し、パケットの解析のため `tcpdump` によるパケットキャプチャを行った。

5.2 環境

実験環境として、Dockerによる仮想ネットワークを用意した。Docker ImageとしてUbuntu20.04のImageに `ndn-cxx` [11], `NFD` [12], `Psync library` [14], `NLSR` [13], `ndn-tools` [11], `shell script` プログラムをインストールし使用した。トポロジとしては、`CA*net4` [6], `GEANT2` [6], `SINET5` [8] を使用した。図5.1, 5.2, 5.3にこれらの構成図を示す。

全実験において、CEEをキャッシュポリシー、Least Recently Used (LRU) をキャッシュリプレースメントポリシーとして用いた。そして、移動や手法に関わらず、全てのコンテンツ要求が近くのキャッシュで満たされることを防ぐため、コンシューマとコンシューマが直接接続されるルータはコンテンツをキャッシュしない状態にしている。

また、実験は冪等性を保つためにネットワークの構築、コンテンツの取得や移動、結果の取得までApple Scriptで自動化されている。

5.3 実験1

実験1では、図5.1の `CA*net4` において、提案手法を適用しない場合、提案手法をプロデューサが直接接続されたルータ (R5,R9,R11,R16) であるEdgeルータにのみ適用した場合、提案手法を全てのルータに適用した場合の3種類に分けて性能評価を行った。

共通の条件として、プロデューサはそれぞれ異なるコンテンツを20種類保持しており、コンシューマは全80種類のコンテンツからランダムなコンテンツを毎秒1つ要求する動作を500回行う。その間約15秒に1度の間隔でプロデューサから別のランダムなプロデューサへコンテンツの移動が行われる。ルータがキャッシュ可能なパケット数は1000に固定する。このキャッシュにはコンテンツだけでなく、`NLSR` や `NFD` により発生する経路管理パケットも含まれるため、実験中に溢れる量である。

表5.1に各条件において得られた10実験分のNackパケット数を示す。ここで、NoRouteパケットとはコンテンツ要求の際にそのコンテンツに対する経路が存在しない時に生成されるNackパケットであり、DuplicateパケットとはルータがInterestパケットを受け取った際にそのパケットに含まれるNonce値と同一のNonce値を持つInterestパケットを自身が既に送信済みの時、ルーティングループを防ぐ目的で生成されるNackパケットである。

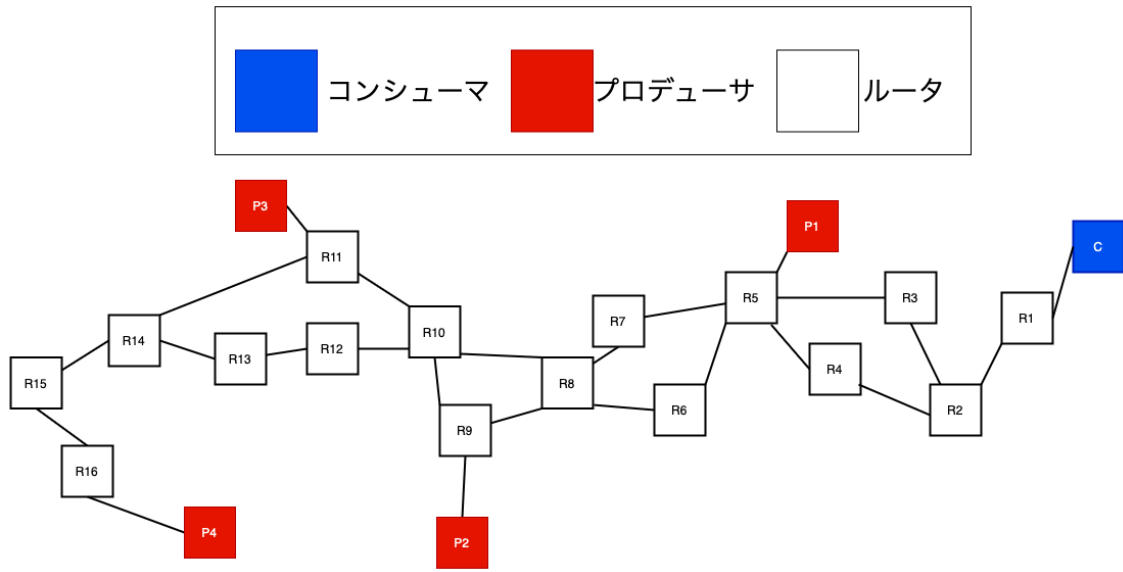


図 5.1: CA*net4 の構成図

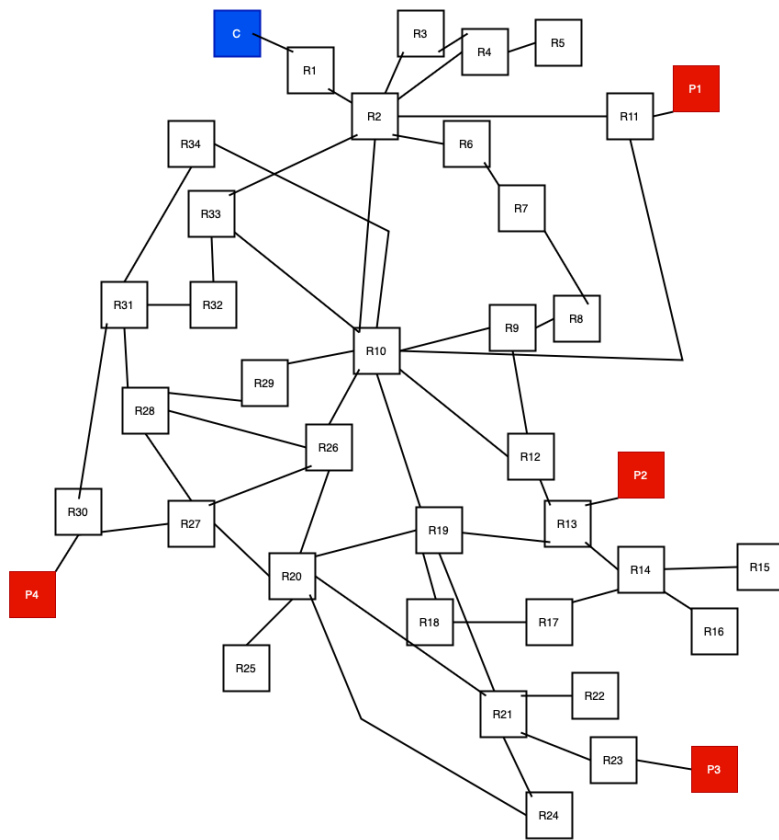


図 5.2: GEANT2 の構成図

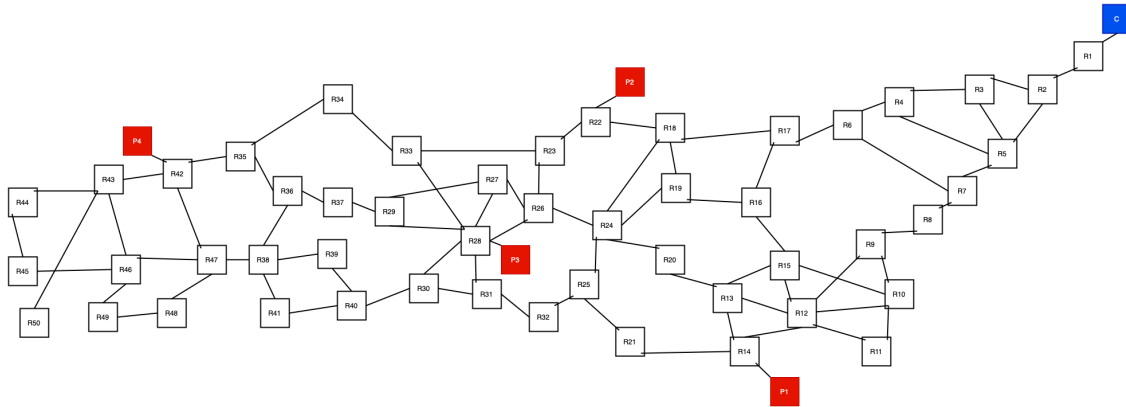


図 5.3: SINET5 の構成図

表 5.1: 各条件における Nack パケットの数

	NoRoute			Duplicate		
	提案手法なし	Edge ルータに適用	全ルータに適用	提案手法なし	Edge ルータに適用	全ルータに適用
1	3	3	2	0	0	13
2	2	3	2	0	0	23
3	3	0	17	0	0	3
4	1	0	5	0	0	11
5	2	2	10	0	0	24
6	3	2	13	0	0	35
7	1	1	5	0	0	14
8	4	1	14	0	0	12
9	3	1	11	0	0	22
10	1	0	7	0	0	26
MIN	1	0	2	0	0	3
MAX	4	3	17	0	0	35
MEAN	2.3	1.3	8.75	0	0	18.42
MEDIAN	2.5	1	7	0	0	14

この表から、提案手法を Edge ルータに適用した場合には、提案手法を適用しない場合と比較して NoRoute 数が減っており、コンテンツ提供が可能となるケースが増えていることが分かる。これは、提案手法によりキャッシュ済みのコンテンツが広告されることで、移動したコンテンツがキャッシュされていた場合、コンテンツを提供可能な経路が残るため、応答確率が増加したためであると考えられる。

しかし、提案手法を全てのルータに適用したケースでは、どちらの Nack パケットも増えており、コンテンツ提供に悪影響を与えていることが分かる。これは、提案手法を有効化したルータの密度が大きいため、経路広告の頻度が非常に高くなり、ルーティングテーブルが不安定になった結果ルーティングループが発生したためだと考えられる。図 5.4 に今回発生した Duplicate パケットの様子を示す。本来、コンテンツを保持するプロデューサに向けて Interest パケットを転送する必要があるが、R2 が提案手法によって広告したコンテンツ情報を持つ R5 や R4 が、キャッシュクリアによる広告情報の削除が同期される前に、R2 に向けて Interest パケットを転送してしまい、Duplicate パケットが発生してしまった。

このように、提案手法の過剰な導入はネットワークを不安定にする危険があり、Edge ルータへの導入で十分効果があると考えられるため、今後の実験では Edge ルータのみに提案手法を適用して実験を行う。

5.4 実験 2

実験 2 では、図 5.1, 5.2, 5.3 の CA*net4, GEANT2, SINET5 において、提案手法を適用しない場合と適用した場合の性能評価を行った。本実験においてもプロデューサはそれぞれ異なるコンテンツを 20 種類保持しており、コンシューマは全 80 種類のコンテンツからランダムなコンテンツを

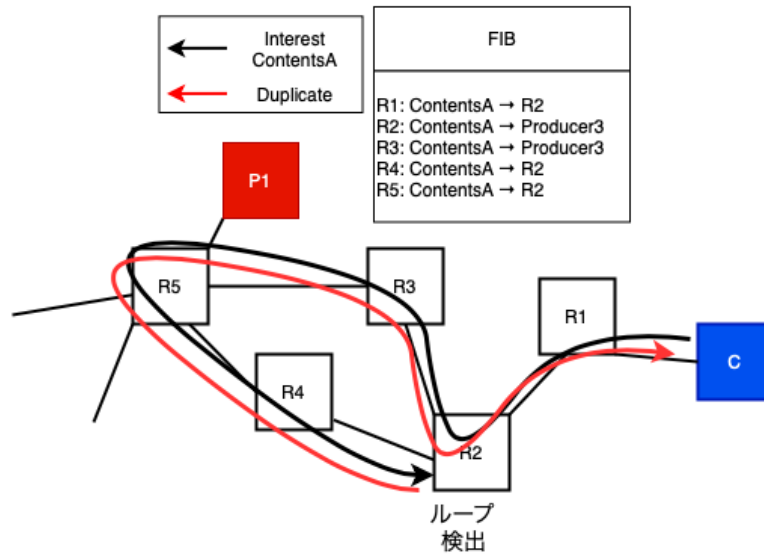


図 5.4: Duplicate パケット

毎秒1つ要求するが、このランダム値を実際のネットワークに近づけるため、式 5.1 に示す Zipf の法則に従うこととし、要求回数は約 3300 回とする。その間約 15 秒に1度の間隔でプロデューサから別のランダムなプロデューサへコンテンツの移動が行われる。また、実験時間の増加に伴いルータがキャッシュ可能なパケット数は 3000 に固定する。

$$f = \frac{c}{r^\alpha} \quad (5.1)$$

ここで、ランク $r = \{1, 2, 3 \dots 20\}$ 、定数 $c=1$ 、 α 値 $\alpha = 1$ とする。

表 5.2 に各条件において得られた 10 実験分の NoRoute パケット数を示す。この数は、一度の移動による NoRoute を 1 回としている。

この表から、提案手法はどのトポロジにおいても NoRoute 数を減少させることが分かる。また、トポロジの違いによる変化について考える。提案手法を適用していない場合のトポロジ毎の NoRoute 数の比率は、あまり変化が無い。これは、コンテンツが移動により広告を取りやめてから移動先で再度広告され、提供可能となるまでの時間の差がトポロジ間であまりなかったためであると考えられる。提案手法を適用した場合のトポロジ毎の NoRoute 数の比率は、GEANT2, CA*net4, SINET5 の順に増加している。この順番は、コンシューマから各 Edge ルータへの平均ホップ数 (5,7.5,9.75) の順番と同じである。これは、ホップ数が短いほど、提案手法によるルータのルーティングアップデートによってコンシューマまで経路情報が到達する時間が短くなり、NoRoute 数が少なくなったと考えられる。

実験中にキャプチャしたパケット情報から、提案手法によるパケット数の変化傾向を考える。図 5.5 に提案手法による各パケットの増加数を、表 5.3 に提案手法による各パケットの増加率を示す。これらのパケット分類は 2.2 節に準じており、10 実験の平均値である。

図 5.5 と表 5.3 から、提案手法はパケット数を増加する副作用があり、特に LSA パケットと Sync パケットがその影響を受けている事が分かる。LSA パケットは、提案手法によりコンテンツ広告の頻度が増加したことが原因であると考えられる。Sync パケットは、提案手法により経路情報の変更回数が増加したことで、同期の必要性が増えたことが原因であると考えられる。逆に、Info パケットは、ネイバーの死活監視にのみ用いられるため提案手法による影響を受けず、数があまり変化しなかったと考えられる。また、このようにパケット数の増加は見られるが、増加率の最大値が CA*net4 における LSA Interest パケットの 1.67 倍であり、殆どの場合において 1.5 倍以下の増加率であるため、大きな問題ではないと考えられる。

表 5.2: トポロジ毎の NoRoute パケット数

	CA*net4		GEANT2		SINET5	
	手法なし	手法あり	手法なし	手法あり	手法なし	手法あり
1	18	1	20	0	27	2
2	14	1	23	1	7	5
3	8	0	6	0	13	3
4	10	1	11	1	5	3
5	9	2	10	0	10	4
6	9	7	7	1	10	4
7	8	0	9	1	27	2
8	2	2	11	1	12	2
9	9	4	12	1	11	3
10	5	1	10	1	12	3
MIN	5	0	6	0	5	2
MAX	25	7	23	1	27	5
MEAN	11.5	1.9	11.9	0.6	13.4	3.1
MEDIAN	9	1	10.5	1	11.5	3

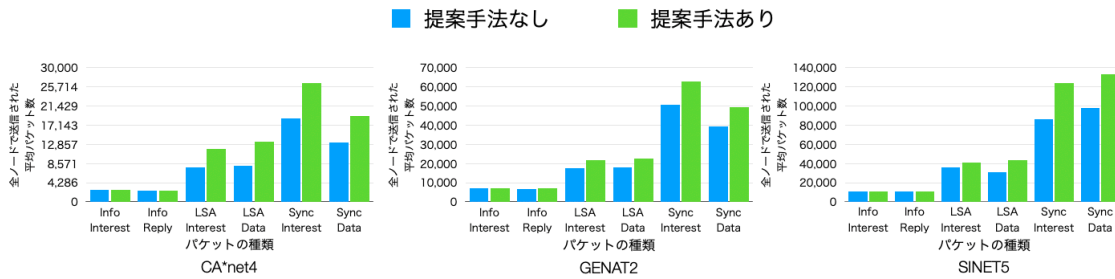


図 5.5: 提案手法によるパケット増加数

表 5.3: 提案手法によるパケット増加率

	CA*net4	GEANT2	SINET5
Info Interest	0.994	1.007	1.005
Info Reply	0.996	1.007	1.005
LSA Interest	1.522	1.253	1.127
LSA Data	1.667	1.257	1.406
Sync Interest	1.425	1.240	1.435
Sync Data	1.437	1.246	1.360

表 5.4: トポロジ毎の NoRoute パケット数

		CA*net4		GEANT2		SINET5	
		手法なし	手法あり	手法なし	手法あり	手法なし	手法あり
Contents:40	MIN	3	1	2	0	3	1
	MAX	11	15	12	9	15	6
	MEAN	5.9	4.3	6.3	2.7	7.5	3.7
	MEDIAN	5.5	3	6	2	6.5	4
Contents:100	MIN	0	1	1	0	1	0
	MAX	11	14	9	9	10	13
	MEAN	3.4	6.4	3.1	4.3	3.2	3.8
	MEDIAN	2	6.5	2	4	3	2

これらの結果から、提案手法は様々なトポロジにおいてコンテンツモビリティサポートが可能であり、プロデューサとコンシューマの距離が近いほど効果を発揮する事が確かめられた。また、手法の有無による NoRoute 数減少の傾向はどのトポロジでも同じであった。これは、コンテンツ数や移動回数、コンテンツ要求回数、提案手法を用いるルータの場所などの条件が同じであったためであり、この条件が同じであればトポロジに寄らず同様の結果となると考えられる。

5.5 実験3

実験3では、実験2の条件の内、各プロデューサが提供するコンテンツ数を40や100に変更した時の変化を評価した。

表5.4に各条件において得られた10実験分のNoRouteパケット数を示す。この数は、一度の移動によるNoRouteを1回としており、上から最小値、最大値、平均値、中央値を示す。

この表から、コンテンツ数40の時は実験2と同じく提案手法によってNoRoute数を減らせる事が分かる。しかし、コンテンツ数の増加に応じて提案手法を適用しない場合のNoRoute数が減少傾向であり、提案手法を適用した場合のNoRoute数が増加傾向であるため、コンテンツ数100の際には提案手法を適用しない場合の方が良い結果となっている。

提案手法を適用しない場合の条件でコンテンツ数が増加した場合、コンテンツ要求の対象が分散され、問題となっている移動中や移動直後により経路が存在せず、提供出来ないコンテンツが要求される可能性が減り、移動前の提供可能なコンテンツへの要求率が上がったためNoRoute数が減少したと考えられる。また、提案手法を適用した場合の条件でコンテンツ数が増加した場合、ルータのキャッシュ容量に対するネットワーク内のコンテンツ数が増え、様々なコンテンツの転送により、キャッシュ/キャッシュクリアの頻度が上がった結果、提案手法を有効化しているルータからの経路広告が頻発した。過剰な経路広告は実験1のようなDuplicateパケットを発生させるルーティンググループや、本来広告されるべき通常の移動前の経路情報の削除や移動後の経路広告の遅延を招き、移動したコンテンツを提供できない時間が増え、NoRoute数が増加したと考えられる。この、提案手法を適用しない場合のNoRoute数減少と提案手法を適用した場合のNoRoute数増加が同時に発生したため、コンテンツ数100の条件では提案手法の有効性が無くなってしまったと考えられる。

コンテンツ数増加に伴う提案手法のスケーラビリティについて確かめるため、実験3でキャプチャしたパケット情報から、各種パケットの特徴について調べる。表5.5にコンテンツ数40の時に各ルータが送信したパケット数と送信したルータが持つリンク数との相関係数、そして、ネットワーク内の全ルータが送信した平均パケット数とネットワーク内に存在するコンシューマ、プロデューサ、ルータ数の合計であるノード数や、ネットワーク内に存在するリンク数の合計である総リンク数との相関係数を示す。

表 5.5: コンテンツ数 40 の時の各パケット数とリンク数, ノード数, 総リンク数との相関係数

	提案手法なし			提案手法あり		
	リンク数	ノード数	総リンク数	リンク数	ノード数	総リンク数
Info Interest	0.934	0.122	0.122	0.933	0.126	0.126
Info Reply	0.911	0.196	0.197	0.911	0.200	0.201
LSA Insterest	0.120	0.513	0.513	0.149	0.185	0.182
LSA Data	0.900	0.048	0.048	0.790	-0.106	-0.108
Sync Interest	0.933	0.328	0.328	0.864	0.221	0.220
Sync Data	0.877	0.439	0.438	0.804	0.407	0.405

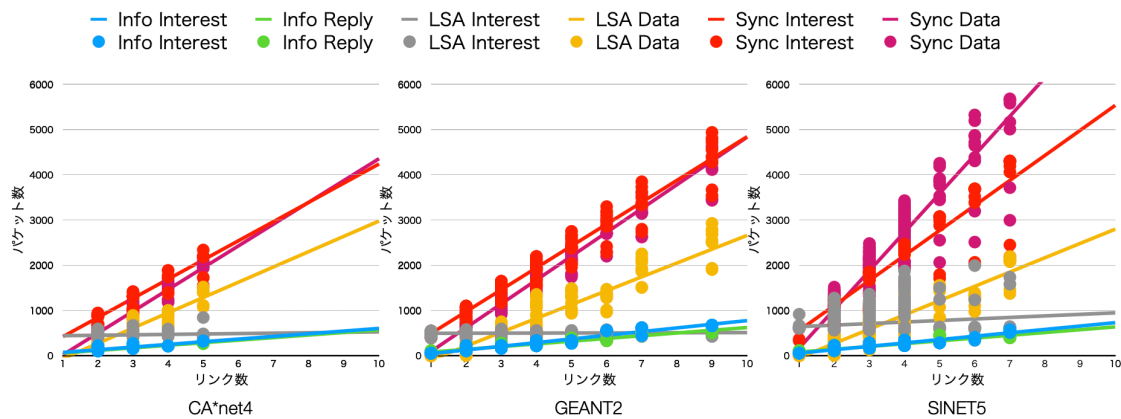


図 5.6: コンテンツ数 20 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

この表から, 各ルータが送信する LSA Interest パケット以外のパケット数はルータのリンク数と相関が非常に高いことが分かる. また, 全ルータが送信する LSA Interest パケットや Sync Data パケット以外のパケットは, ネットワーク内の全ノード数や総リンク数と相関が非常に低い事が分かる. このことから, ルータのリンク数の増加がネットワーク内で発生するパケット数に与える影響が大きく, ネットワーク内のノード数や総リンク数の増加がパケット数の増加に与える影響は少ないと考えられるため, リンク数に着目してパケット数の変化を考える.

表 5.6 に, 実験 2,3 のデータを元に, 提案手法を適用しない条件で, 各ルータのリンク数を説明変数として回帰分析で求めた, 各ルータが送信するパケット数の傾きと切片を示す.

図 5.6,5.7,5.8 に, 各ルータが送信したパケット数の実測値と, 表 5.6 の値を元に作成した, 各ルータのリンク数を説明変数とした回帰直線を示す.

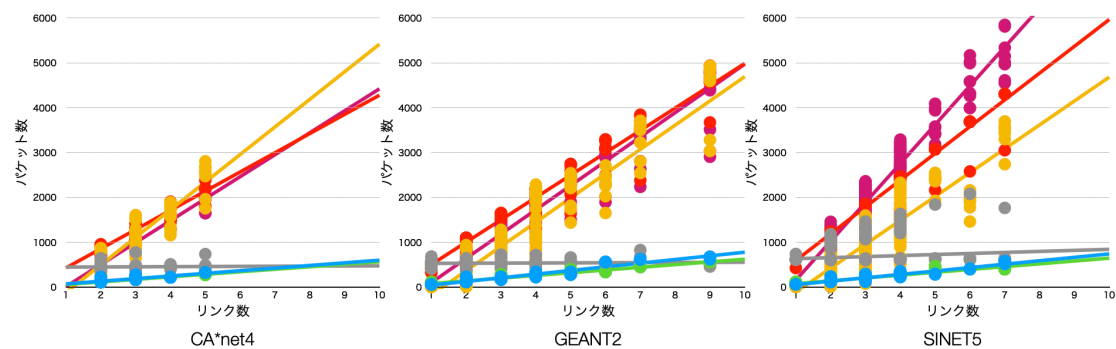


図 5.7: コンテンツ数 40 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

表 5.6: リンク数を元にした回帰分析 (提案手法なし)

		CA*net4		GEANT2		SINET5	
		傾き	切片	傾き	切片	傾き	切片
Contents:20	Info Interest	59.0	10.8	81.2	-39.2	74.9	-20.9
	Info Reply	56.7	-0.10	60.3	16.0	62.1	14.0
	LSA Insterest	9.39	430	1.81	490	34.0	605
	LSA Data	338	-405	306	-403	316	-365
	Sync Interest	424	-5.24	484	5.60	553	0.621
	Sync Data	481	-465	527	-436	854	-689
Contents:40	Info Interest	58.7	11.1	81.6	-39.5	76.1	-23.4
	Info Reply	56.5	0.02	60.4	16.4	63.1	12.3
	LSA Insterest	3.14	441	2.81	524	23.3	608
	LSA Data	615	-736	541	-719	533	-645
	Sync Interest	428	-2.02	498	3.56	597	-6.59
	Sync Data	490	-480	542	-444	867	-713
Contents:100	Info Interest	58.5	10.8	81.2	-40.5	75.5	-21.5
	Info Reply	56.3	-0.10	60.4	13.9	62.9	12.7
	LSA Insterest	4.10	440	4.89	548	9.68	609
	LSA Data	930	-1095	840	-1115	758	-899
	Sync Interest	431	1.60	531	1.19	592	-1.30
	Sync Data	494	-483	579	-484	860	-713

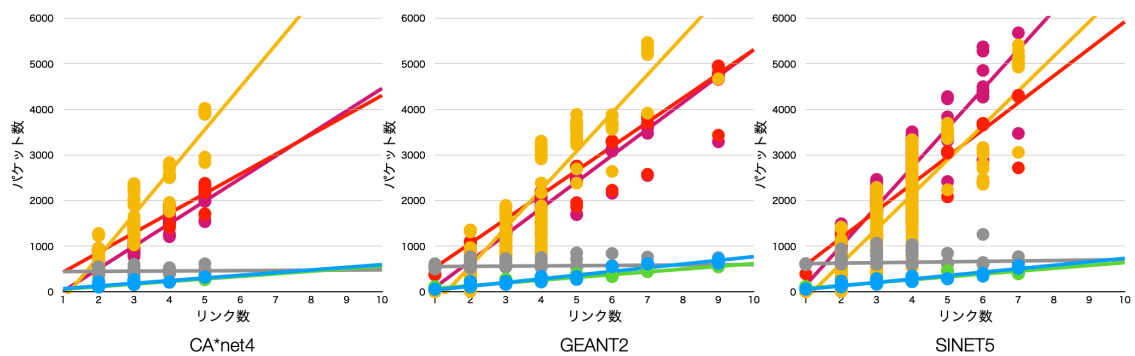


図 5.8: コンテンツ数 100 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

表 5.7: リンク数を元にした回帰分析 (提案手法あり)

		CA*net4		GEANT2		SINET5	
		傾き	切片	傾き	切片	傾き	切片
Contents:20	Info Interest	58.9	9.82	82.3	-40.8	75.1	-20.7
	Info Reply	56.4	0.00	60.7	16.0	62.8	12.8
	LSA Insterest	6.22	676	2.38	613	-1.99	804
	LSA Data	575	-705	387	-513	448	-524
	Sync Interest	604	-6.88	599	8.08	795	-1.72
	Sync Data	702	-693	654	-535	1171	-966
Contents:40	Info Interest	58.4	10.7	81.6	-40.0	75.6	-21.8
	Info Reply	56.1	-0.22	60.6	15.2	63.1	12.4
	LSA Insterest	-46.5	1126	34.0	760	16.4	992
	LSA Data	1495	-1883	682	-885	789	-927
	Sync Interest	889	1.32	697	5.54	948	-9.03
	Sync Data	1053	-1063	759	-618	1482	-1233
Contents:100	Info Interest	58.6	10.6	81.5	-39.6	74.7	-22.0
	Info Reply	56.2	-0.08	60.0	17.0	62.6	11.1
	LSA Insterest	-165	2519	36.0	1151	0.417	1777
	LSA Data	4253	-5425	1251	-1615	1731	-1964
	Sync Interest	1656	16.9	916	-8.45	1613	6.44
	Sync Data	1992	-2026	997	-807	2345	-1964

これらの表やグラフから、どの条件においても実測値は回帰直線に近い値となっており、各ルータが送信するパケット数はリンク数に線型比例していることが分かる。また、同一コンテンツ数では、ネットワークサイズの拡大に応じて Sync Data パケットが増加傾向であり、同一トポロジでは、コンテンツ数の増加に応じて LSA Data パケットが増加傾向であることが分かる。

表 5.7 に、実験 2,3 のデータを元に、提案手法を適用した条件で、各ルータのリンク数を説明変数とした回帰分析で求めた、各ルータが送信するパケット数の傾きと切片を示す。

図 5.9,5.10,5.11 に、各ルータが送信した実測値と、表 5.7 の値を元に作成した、各ルータのリンク数を説明変数とした回帰直線を示す。

これらの表やグラフから、コンテンツ数が 20 や 40 の時の実測値は提案手法なしと同様回帰直線に近い値となっており、各ルータが送信するパケット数はリンク数に線型比例しているが、コンテンツ数が 100 の時は実測値と回帰直線に乖離が見られることが分かる。また、同一コンテンツ数では、

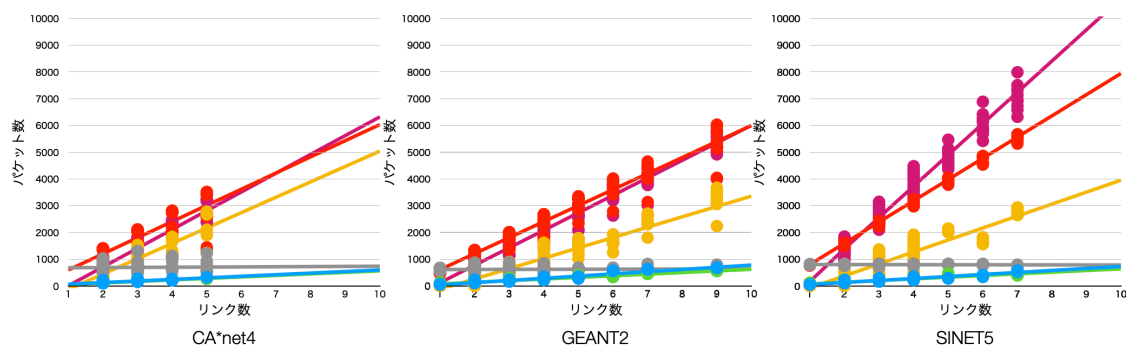


図 5.9: コンテンツ数 20 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

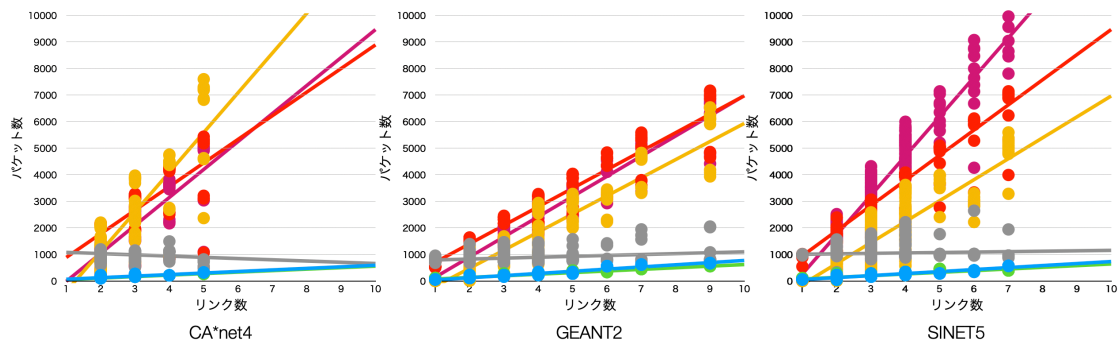


図 5.10: コンテンツ数 40 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

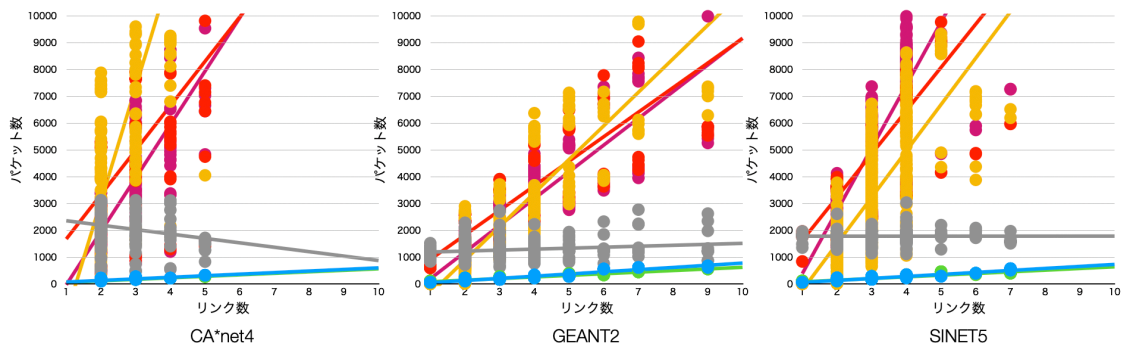


図 5.11: コンテンツ数 100 の時の各トポロジにおけるリンク数に対するパケット数の実測値と回帰直線

GEANT2, CA*net4, SINET5 の順に Sync Data パケットが増加傾向であり、同一トポロジでは、コンテンツ数の増加に応じて LSA Data, Sync Interest, Sync Data パケットが増加傾向であることが分かる。

同一コンテンツ数における増加傾向が提案手法の有無により変化した理由は、実験 2 で示した通り、GEANT2 のコンシューマから各 Edge ルータへの平均ホップ数が短く、提案手法のコンテンツ広告によるパケット数増加の影響が少ないためであると考えられる。また、同一トポロジにおける Sync Interest, Sync Data パケットの増加は、提案手法によってコンテンツを提供する擬似的なプロデューサが増えた結果、経路広告の頻度が増えたためであると考えられる。

同一コンテンツ数において、ネットワークサイズの拡大に応じて Sync Data パケットのパケット数が増加する原因を考える。図 5.12 にコンテンツ数 40 の時の各トポロジにおける Sync Data パケットのパケット長を示す。

この図から、ネットワークサイズの大きいトポロジほどパケット長が伸び、ヒストグラムの山が右に移動している事が分かる。SINET5 においては値の小さな位置にも山ができています。これは、パケット長が伸びた結果、フラグメントによりパケットが分割された事を示している。フラグメントの原因として、Sync Data パケットにはハッシュ化した各 LSA が含まれているため、トポロジの拡大によってノード数が増えた結果 LSA の数が増え、パケット数が増加したと考えられる。

また、ノード数が増加した際のパケット数の変化の詳細を確認する。図 5.13 にコンテンツ数が 40 の時にノード数を変化させた時のネットワーク内のルータが送信した平均パケット数を示す。

この図から、CA*net4 と SINET5 のようにノード数が 3 倍近い増加率である場合も、パケット数の増加率は 2 倍程度であることが分かる。また、GEANT2 と SINET5 においてパケット数の増加率が上がっているが、これはフラグメントの影響であり、ノード数に対する増加率は線型に収まっている。

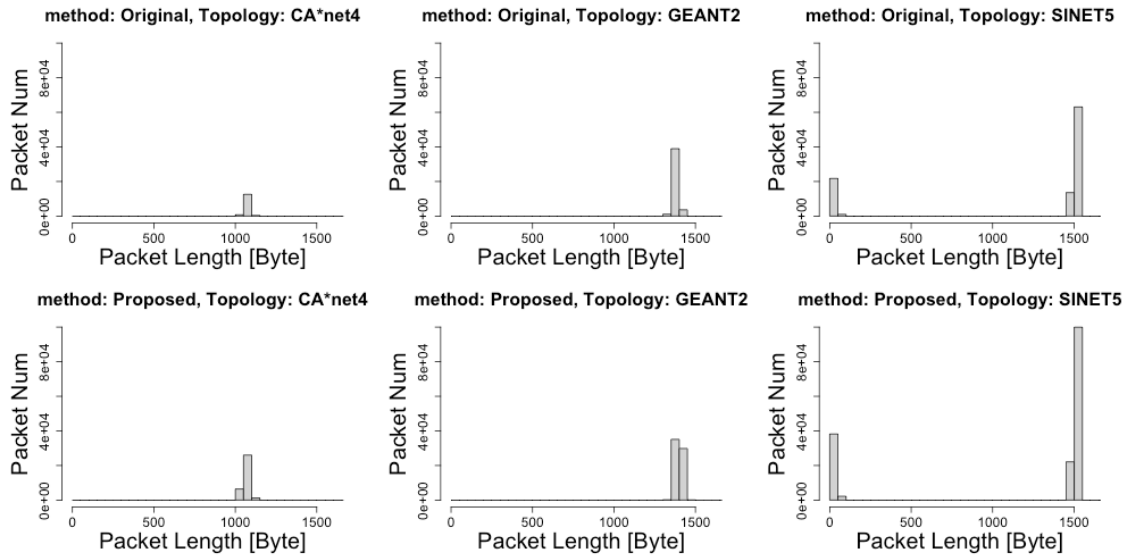


図 5.12: コンテンツ数 40 の時の各トポロジにおける Sync Data パケットの packets 長

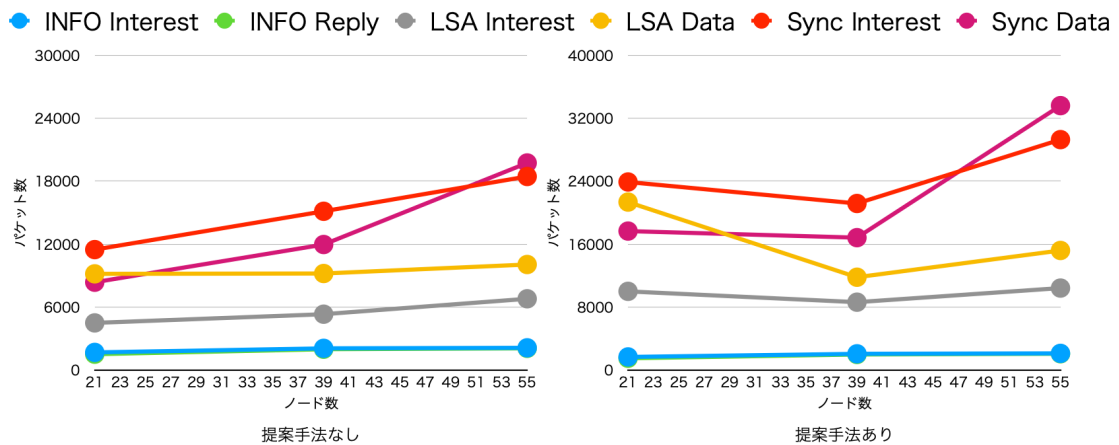


図 5.13: ノード数を変化させた時のコンテンツ数 40 におけるルータが送信した平均パケット数

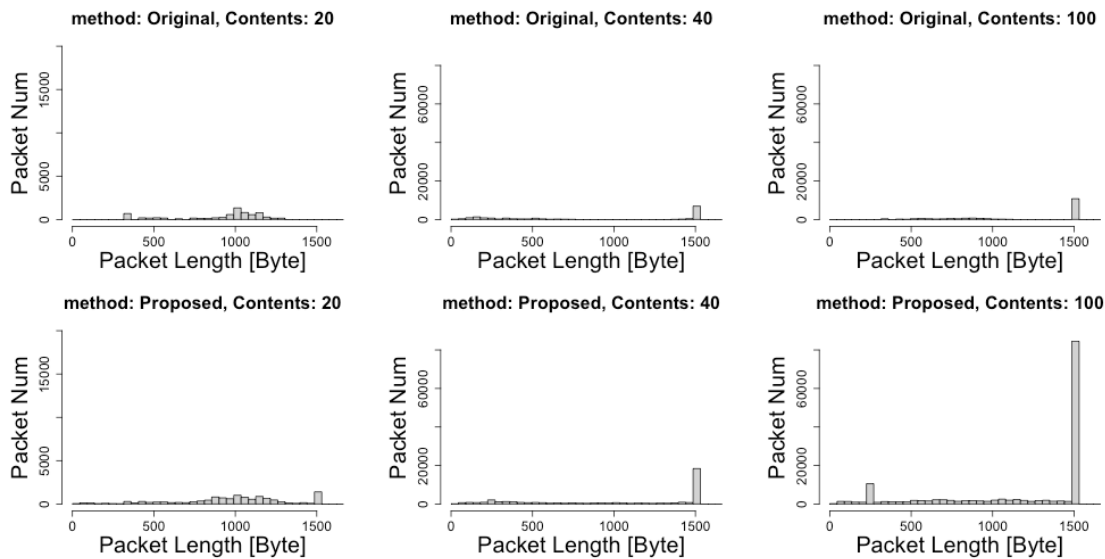


図 5.14: コンテンツ数を変化させた時の CA*net4 における LSA Data パケットの packet 長

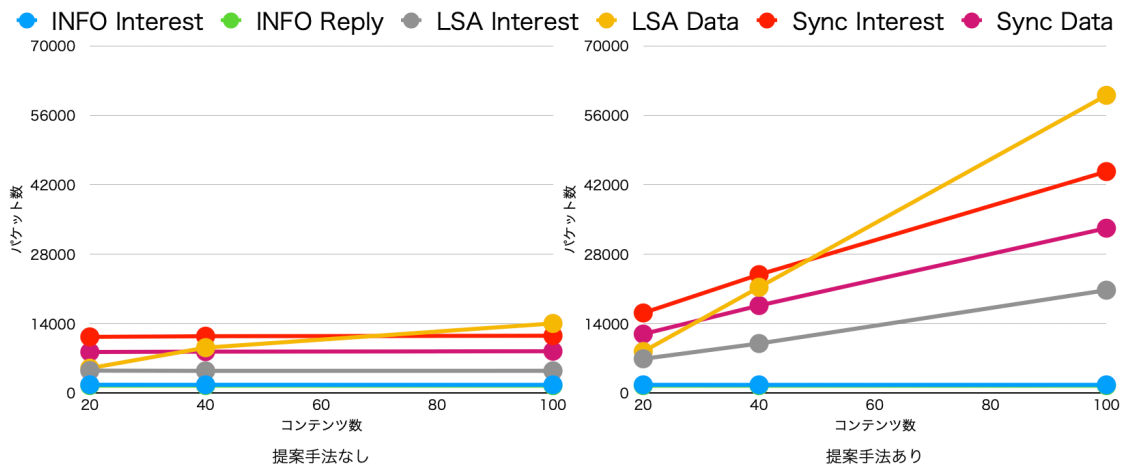


図 5.15: コンテンツ数を変化させた時の CA*net4 におけるルータが送信した平均パケット数 (出典: [19] の図 14)

次に、同一トポロジにおいて、コンテンツ数の増加に応じて LSA Data パケットの packet 数が増加する原因を考える。図 5.14 にコンテンツ数を変化させた時の CA*net4 における LSA Data パケットの packet 長を示す。

この図から、コンテンツ数が多いほど packet 長が伸び、フラグメントが増えていることが分かる。フラグメントの原因として、LSA Data パケットには LSA 更新用のコンテンツ情報が含まれているため、コンテンツ数の増加によってコンテンツ情報が増えた結果 packet 長が伸びたと考えられる。packet 長が長い程、フラグメントの回数は増えるため、提案手法を適用した場合におけるコンテンツ数 100 の packet 数が非常に多くなった。

また、コンテンツ数が増加した際の packet 数の変化の詳細を確認する。図 5.15 にコンテンツ数を変化させた時の CA*net4 におけるネットワーク内のルータが送信した平均 packet 数を示す。

この図から、提案手法ではコンテンツ数の増加に応じて packet 数も増加しているが、コンテンツ数に対するキャッシュ容量が十分であれば packet の増加率は線型に収まっている。

これらの結果から、提案手法を用いた NLSR の packet 数はリンク数に対して線型に増加する関係であるため、スケラブルであるといえる。また、コンテンツ数 100 の時は回帰分析から少し外れた

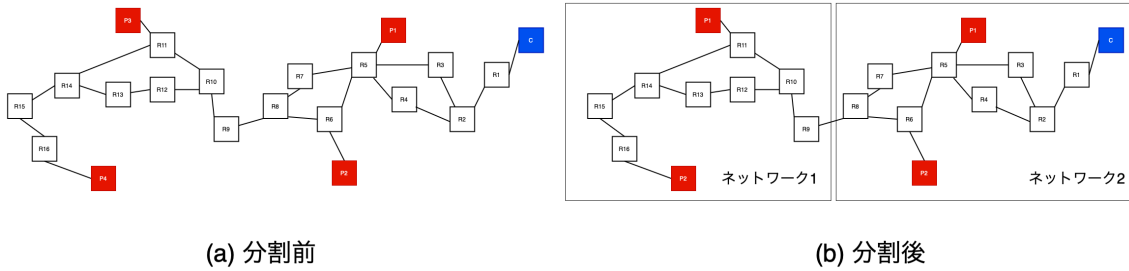


図 5.16: ネットワーク分割実験用の構成図

値となっていたが、これは提供するコンテンツ数に対してキャッシュ容量を非常に少なくしているためである。通常のネットワークにおいて一つのプロデューサがキャッシュ容量に対して大量の Move コンテンツを保持する場合は、問題にならないと思われる。

5.6 実験 4

実験 4 では、図 5.16 に示す CA*net4 を元にしたトポロジにおいて、ネットワークを分割しない場合と分割した場合における、ネットワーク内のパケット量の変化について評価した。ネットワークを分割した場合においては、各ネットワークの境界ルータ (R8, R9) に、境界ルータ同士が自身の所属するネットワークの経路情報を交換し合う関係となり、受信した経路情報を集約し、所属ネットワーク内に広告する機能を追加する。また、集約の効果を検証するため、ネットワークを分割した場合においては、集約機能を無効にした条件についても評価する。

機能の詳細としては、境界ルータがネットワーク内の経路情報を定期的に確認し、新たなコンテンツ情報を発見した際にその情報を外部の境界ルータに送信する。境界ルータは外部ネットワークからの経路情報の受信も定期的に確認し、新たな経路情報を受信した場合その経路情報を可能な限り集約し、自身が所属するネットワークに対して経路広告を行う。この際、境界ルータは経路を受信したインターフェースに対して静的経路の作成を行うことで実際のコンテンツへの到達性を持たせる。これにより、分割したネットワークにおいて外部のコンテンツに対しても要求可能となる。この機能は他の実験と異なり境界ルータにのみ適用する。

本実験においてはプロデューサはそれぞれ異なるコンテンツを 40 種類保持しており、コンシューマは全 160 種類のコンテンツからランダムなコンテンツを毎秒 1 つ要求する。このランダム値を式 5.1 に示す Zipf の法則に従うこととし、要求回数は約 2400 回とする。ここで、ランク $r = \{1, 2, 3 \dots 160\}$ 、定数 $c=1$ 、 α 値 $\alpha = 1$ とする。その間約 10 秒に 1 度の間隔でプロデューサから別のランダムなプロデューサへコンテンツの移動が行われる。また、ルータがキャッシュ可能なパケット数は 3000 に固定する。

表 5.8 に各条件における NoRoute パケット数を示す。この数は、一度の移動による NoRoute を 1 回としている。

この表から、提案手法を用いて経路を集約した場合、NoRoute 数が減少していることが分かる。ネットワークの分割により、コンテンツ情報がネットワーク内で伝搬される時間が短縮されており、別のネットワークで広告される情報も集約されているため、移動したコンテンツの情報がコンシューマまで伝えられる時間が短くなったのが理由と考えられる。しかし、経路を集約しなかった場合の NoRoute 数は、提案手法なしと比較してあまり変化がなかった。集約を行わない場合、全てのコンテンツが全ネットワークで広告されるため、通常時と同等の広告時間になったのが理由と考えられる。

図 5.17 に各条件におけるパケット増加率を示す。

この図から、提案手法を用いて経路を集約した場合、パケット数が減少していることが分かる。ネットワークの分割により、各ネットワーク内のルータ数が減少したことで、LSA を含んだパケット長が縮小し、フラグメント数が削減されたことや、コンテンツ移動時に発生する経路更新の頻度が低下

表 5.8: 各条件における NoRoute パケット数

	提案手法なし	提案手法あり	提案手法あり (集約なし)
1	3	0	6
2	22	1	16
3	9	1	8
4	16	3	8
5	10	0	18
6	8	1	13
7	6	0	13
8	14	0	7
9	13	1	6
10	16	1	6
MIN	3	0	6
MAX	22	3	18
MEAN	11.7	0.8	10.2
MEDIAN	11.5	1	8

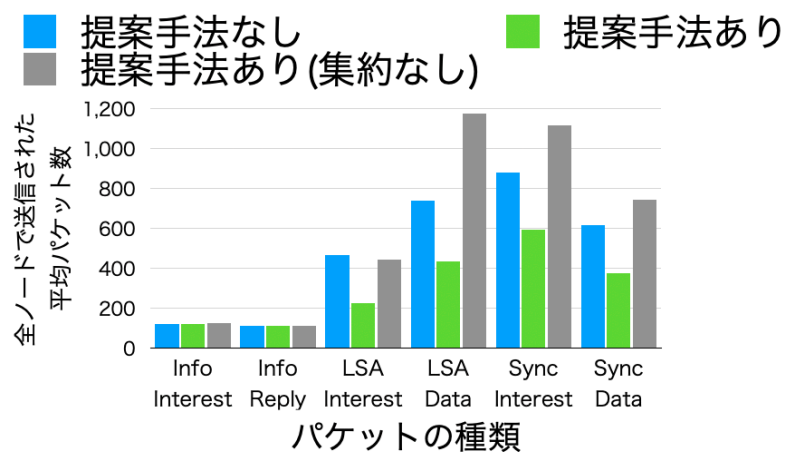


図 5.17: 各条件におけるパケット増加率

したことが理由と考えられる。しかし、経路を集約しない場合の packets 数は、種類によっては提案手法なしと比較して増加傾向である。LSA Data packets は経路情報の更新広告を行う際に用いられ、提案手法による内部ネットワークへの外部経路の広告が全てのコンテンツに対して行われたため、packets 数が増加したと考えられる。また、Sync packets は経路情報の同期に用いられ、提案手法により分割されたネットワークでネットワーク全体の経路情報が同期され、同期もネットワーク毎に別々に行われたため、packets 数が増加したと考えられる。

これらの結果から、分割したネットワークに対する集約経路の広告はコンテンツモビリティサポートと、packets 量の削減が可能であることが示された。集約をしない場合の経路広告は packets 数の増加などを引き起こしているが、これは全ての集約対象のコンテンツが別々のネットワークに移動し集約不可となるケースを示しており、最も悪い状況であっても提案手法なしと比較して増加率も致命的でないため、導入に対する問題にはならないと考えられる。

5.7 評価

実験 1 から、提案手法は特定のトポロジにおいてコンテンツモビリティサポートが可能であるが、過剰に導入してしまうとネットワークを不安定にする恐れがあることが示された。実験 2 から、提案手法はトポロジに関わらずコンテンツモビリティサポートが可能であるが、コンテンツ広告により packets 数が多少増加してしまうことが示された。この有効性は、コンシューマと提案手法を適用したルータとの距離が近いほど高くなる。実験 3 から、提案手法における packets 数は、コンテンツ数やノード数が増加した場合もルータのリンク数に対して線型に増加するため、コンテンツ数がキャパシティに対して非常に多い場合を除き、スケーラビリティが確保されていることが示された。実験 4 から、ネットワークを分割した場合も集約経路を広告することで NLSR の動作が可能であるため、過度なノード数の場合も分割によりスケーラビリティが保てることを示された。

これらの実験から、提案手法を Edge ルータに適用することでコンテンツモビリティがサポート可能であり、スケーラビリティも確保されていることが示された。

第6章 結論

6.1 まとめ

これらの結果から、様々なトポロジやコンテンツ数において、提案手法はコンテンツモビリティサポートが可能であることを示せた。提案手法の欠点として、コンテンツ広告によるサポートを行う性質上、ルータが送信するパケット数が増加してしまうが、キャッシュ容量が十分であればスケール可能な範囲であり問題にはならない事も示せた。

6.2 展望

今後の展望としては、経路広告やコンテンツ要求の頻度など、今回の実験では値を固定したパラメータを変動させた時の動作から、提案手法の更なる有効性の確認をしたいと思う。また、ネットワークの規模やコンテンツ数と、ルータがキャッシュ可能なパケット数を細かく変動させる事で、提案手法が有効である限界を確認したいと思う。

参考文献

- [1] Muhammed Zaharadeen Ahmed, Afaf Mirghani Hassan, Abdulkadir H Alkali, Aisha Hassan Abdallah Hashim, Othman Omran Khalifa, and Huda Adibah Bt Mohd Ramli. Performance evaluation of scenerio-aware protocol for producer mobility support in ndn. In *2019 7th International Conference on Mechatronics Engineering (ICOM)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [2] David Eppstein, Michael T. Goodrich, Frank Uyeda, and George Varghese. What’s the difference? efficient set reconciliation without prior context. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference*, SIGCOMM ’11, page 218–229. Association for Computing Machinery, 2011.
- [3] Chao Fang, Haipeng Yao, Zhuwei Wang, Wenjun Wu, Xiaoning Jin, and F Richard Yu. A survey of mobile information-centric networking: Research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3):2353–2371, 2018.
- [4] Wenliang Fu, Hila Ben Abraham, and Patrick Crowley. Synchronizing namespaces with invertible bloom filters. In *2015 ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS)*, pages 123–134. IEEE, 2015.
- [5] AKM Mahmudul Hoque, Syed Obaid Amin, Adam Alyyan, Beichuan Zhang, Lixia Zhang, and Lan Wang. Nlsr: Named-data link state routing protocol. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking*, pages 15–20, 2013.
- [6] MURASE Ichiro. Trends on network testbeds in the world. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, 52(3/4):21–30, 2005.
- [7] Van Jacobson, Diana K Smetters, James D Thornton, Michael F Plass, Nicholas H Briggs, and Rebecca L Braynard. Networking named content. In *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, pages 1–12, 2009.
- [8] Hikaru Matsumura, Kazuko Egawa, Toyomi Takekawa, Hideki Higuchi, Mitsuhiro Doi, Mitsunori Maeda, Tadato Yamamoto, Ryosuke Imai, Yoshihiro Kubota, Mayuko Saito, Shigeo Urushidani, Motonori Nakamura, Takashi Kurimoto, Koji Sasayama, Yusheng Ji, Hiroki Takakura, Shunji Abe, Kensuke Fukuda, Michihiro Koibuchi, and Kenjiro Yamanaka. Sinet5 and its next step. In *Proc. of the 2018 AXIS General Conference*. Academic eXchange for Information Environment and Strategy (AXIES), 2018. (in Japanese).
- [9] Named Data Networking Project Team. ndn-cxx: NDN C++ library with eXperimental eXtensions, 8 2020.
- [10] Named Data Networking Project Team. NFD Developer’s Guide, 7 2021.
- [11] Named Data Networking Project Team. ndn-cxx: Ndn c++ library with experimental extensions. <https://github.com/named-data/ndn-cxx>.
- [12] Named Data Networking Project Team. Nfd - named data networking forwarding daemon. <https://github.com/named-data/NFD>.

- [13] Named Data Networking Project Team. Nlsr: Named data link state routing protocol. <https://github.com/named-data/NLSR>.
- [14] Named Data Networking Project Team. Psync: Partial and full synchronization library for ndn. <https://github.com/named-data/PSync>.
- [15] George Xylomenos, Christopher N Ververidis, Vasilios A Siris, Nikos Fotiou, Christos Tsilopoulos, Xenofon Vasilakos, Konstantinos V Katsaros, and George C Polyzos. A survey of information-centric networking research. *IEEE communications surveys & tutorials*, 16(2):1024–1049, 2013.
- [16] Minsheng Zhang, Vince Lehman, and Lan Wang. Scalable name-based data synchronization for named data networking. In *IEEE Infocom 2017-IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1–9. IEEE, 2017.
- [17] Yu Zhang, Zhongda Xia, Spyridon Mastorakis, and Lixia Zhang. Kite: Producer mobility support in named data networking. In *Proceedings of the 5th ACM Conference on Information-Centric Networking*, pages 125–136, 2018.
- [18] Zhenkai Zhu and Alexander Afanasyev. Let’s chronosync: Decentralized dataset state synchronization in named data networking. In *2013 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pages 1–10. IEEE, 2013.
- [19] 御法川凌太 and 中里秀則. Ndn におけるキャッシュコンテンツ広告のスケラビリティ. *電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報*, 123(148):1–6, 2023.

研究業績

[1] 御法川 凌太, 中里 秀則, NDN におけるコンテンツモビリティサポート, 電子情報通信学会ソサイエティ大会,2021

[2] 御法川 凌太, 中里 秀則, NDN における NLSR によるキャッシュコンテンツ広告のトラヒックへの影響, 電子情報通信学会総合大会,2022

[3] 御法川 凌太, 中里 秀則, NDN におけるキャッシュコンテンツ広告のスケーラビリティ, 電子情報通信学会/情報ネットワーク研究会,2023

[4] Ryota Minorikwa, Hidenori Nakazato, Applicability of Contents Mobility Support Exploiting Caching and NLSR in NDN, Globecom,2023