
NDNの遺伝的アルゴリズムを用いた コンテンツ配置設計

立命館大学大学院 情報理工学研究科*

立命館大学 情報理工学部**

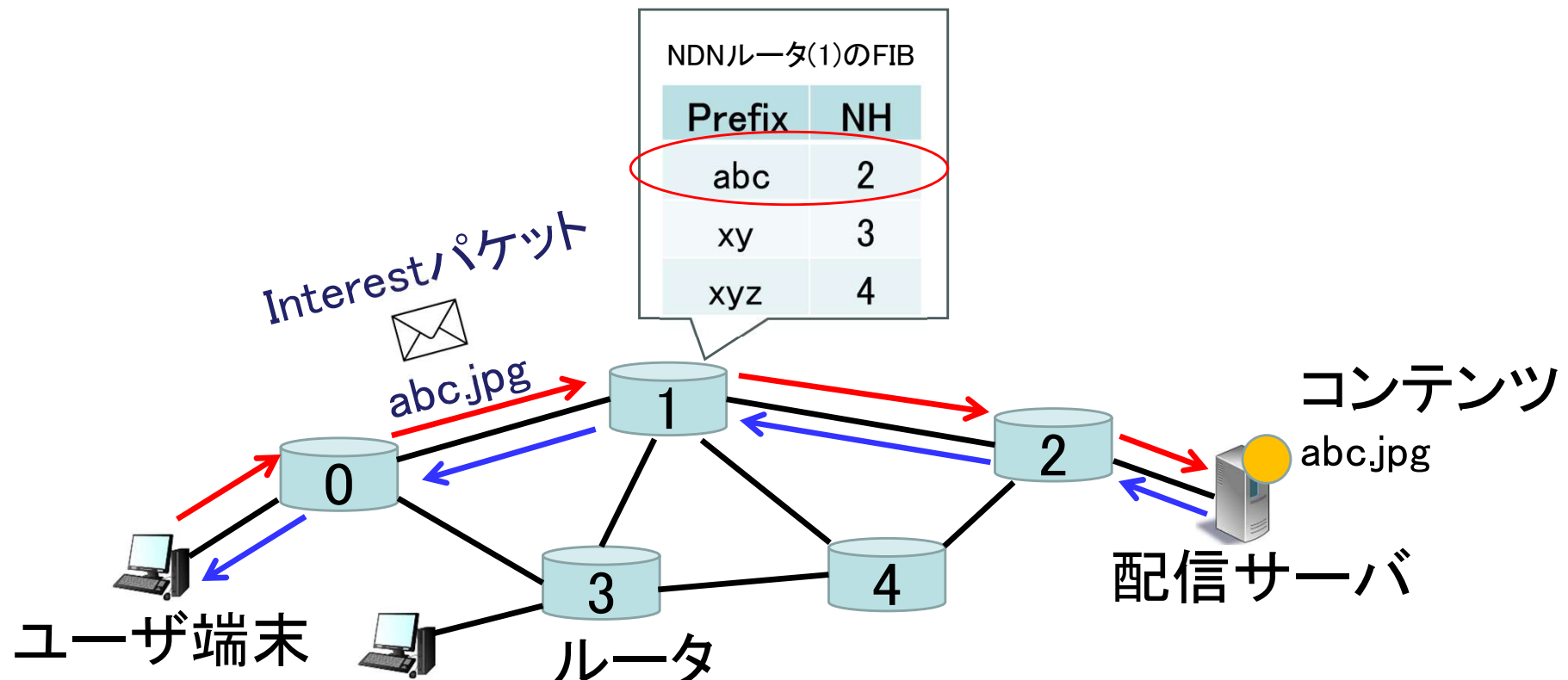
橋本紘輝* 上山憲昭**

2025年3月7日

電子情報通信学会 ネットワークシステム(NS)研究会

研究背景

- ICN (情報指向ネットワーク: information-centric networking)
 - コンテンツ名でデータを直接要求
 - Interestパケットはルータ上の転送テーブル(FIB :Forwarding Information Base)を参照して配信サーバに送信
 - 配信サーバからユーザにコンテンツが返送
 - 本研究ではNDN (named data networking)を想定



課題: FIBのスケール性

- ネットワークの大規模化によりPrefixの数が増大
- 地域性がなくFIBのエントリ集約が**困難**

➡ FIBの必要メモリ量と検索時間が大幅に**増大**

- 例: Webコンテンツのみを考慮した場合

NDN FIB: 約 10^9 のエントリが必要* vs **IP FIB**: 約 10^5 のエントリ

NDNルータのFIB

Prefix	NH
abc	0
xy	1
xyz	3

IPルータのFIB

Prefix	NH
223.1.1.1	0
223.2.1.1	1
224.1.1.3	2

NH: next hop

既存研究

■ 部分キャッシュ*

- 一部のPrefixにおいてFIBを作成
- Prefixが無い場合は管理ノードに問い合わせ

■ 経路制御**

- NAC(Name Collector) と呼ばれるノードをネットワーク中に配置
- 経路限定されるためFIBエントリ低減

■ フラッディング***

- FIBを利用しない
- Interestパケットを周辺ノードにブロードキャスト

■ コンテンツの配置制御

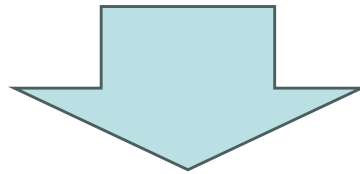
* A. Afanasyev, C. Yi, L. Wang, B. Zhang, and L. Zhang, “SNAMP: Secure namespace mapping to scale NDN forwarding,” in Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Communication Workshops, pp. 281–286, May 2015.

**T. C. Schmidt, S. Wolke, N. Berg, and M. Wahlisch, “Let’s collect names: How PANINI limits FIB tables in name based routing,” in Proceedings of 2016 IFIP Networking Conference and Workshops, pp. 458–466, May 2016.

*** R. Chiochetti, D. Rossi, and G. Caroglio, Exploit the Known or Explore the Unknown? Hamlet-Like Doubts in ICN, ACM ICN 2012..

コンテンツ配置制御（先行研究）*

- NDNのコンテンツ配置制御によるFIB削減法
 - FIB集約効果を高めるコンテンツのオリジナル再配置
 - 米国の商用トポロジを用いてFIBエントリを約45%低減
 - ノード位置やFIBサイズ以外の性能について**未考慮**



FIBサイズだけでなくネットワーク品質も考慮した
NDNのオリジナル配置の研究

* Y. Sasaki, N. Kamiyama, and Y. Ji., Designing, Designing Content Placement of CDN for Improving Aggregation Effect of ICN FIBs, ICOIN 2020.

コンテンツ配置制御によるFIB削減法-1

■ FIB集約法

- URLをコンポーネント単位で逆順に並び替え
- LPM (Longest prefix matching) を利用
- コンテンツ名の上位部分とNHが一致

集約前

Prefix	NH
jp/post/zib	R3
jp/post/abs	R3
jp/post/ac	R4
com/google	R5

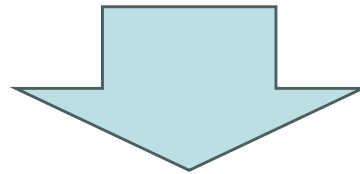


集約後

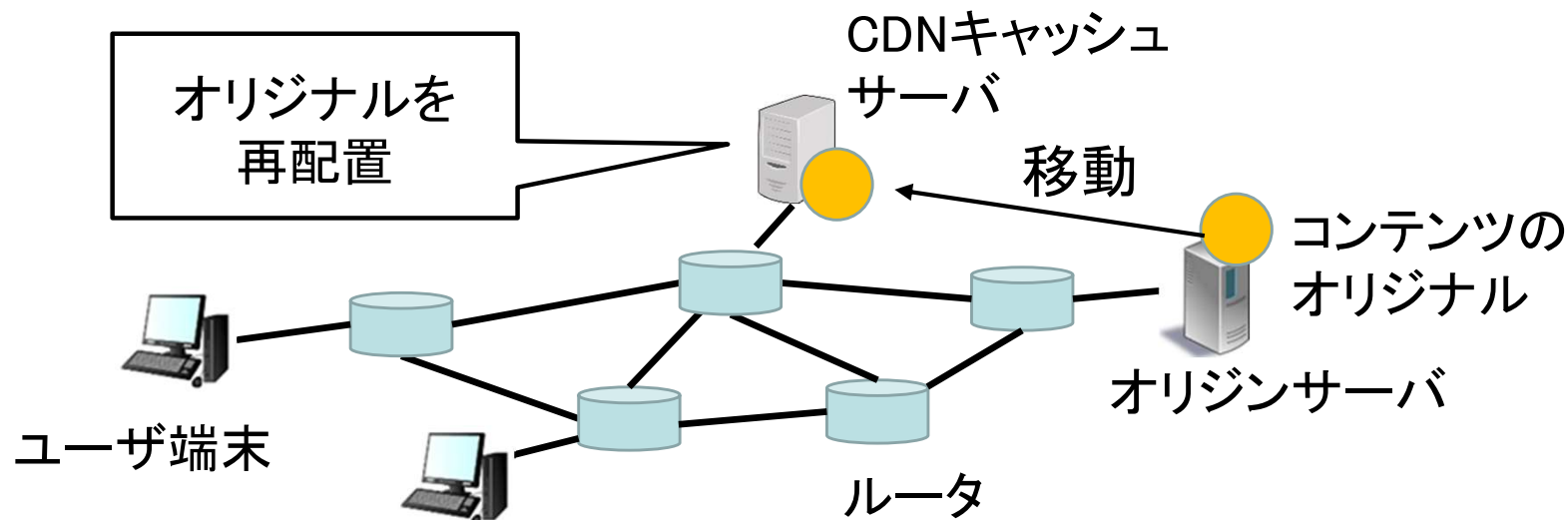
Prefix	NH
jp/post/*	R3
jp/post/ac	R4
com/google	R5

コンテンツ配置制御によるFIB削減法-2

- CDNを活用してコンテンツのオリジナルを再配置
 - CDNキャッシュサーバはキャッシュされたコンテンツのPrefixをネットワーク上に広告可能
 - Publisherのホストになることが可能

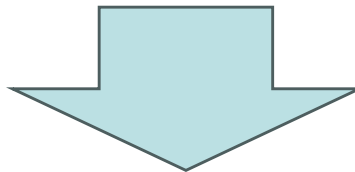


似た名前のコンテンツを同じ場所に配置することでFIB集約効果の**向上**



本研究の目的

- 発見的手法によるコンテンツ再配置*
 - ネットワークの中心から人気の高いコンテンツを配置
 - FIBサイズとリンク負荷を低減
 - 特定ノードの可用性低下や特定リンクへの負荷集中が課題
 - 複数のネットワーク指標を考慮した配置の検討が必要
 - コンテンツ配置は組合せ最適化問題

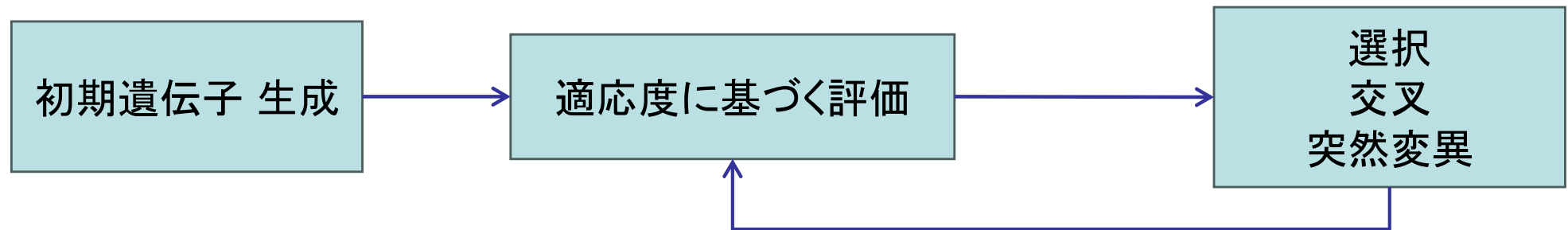


- メタヒューリスティックなアルゴリズムを用いた配置法
 - 遺伝的アルゴリズム(GA: genetic algorithm)を用いたコンテンツ配置法
 - 実現性と有効性の高いFIB削減法を目指す

遺伝的アルゴリズム

■ メタヒューリスティックなアルゴリズム

- 生成した遺伝子(=解)をあらかじめ定義された条件まで以下の操作を繰り返す
- 繰り返す操作
 - 適応度関数による遺伝子の評価
 - 次世代遺伝子のための選択, 交叉, 突然変異
- 適応度の高い遺伝子を次の世代に残す



GAの設計方針

■ 遺伝子 g_i

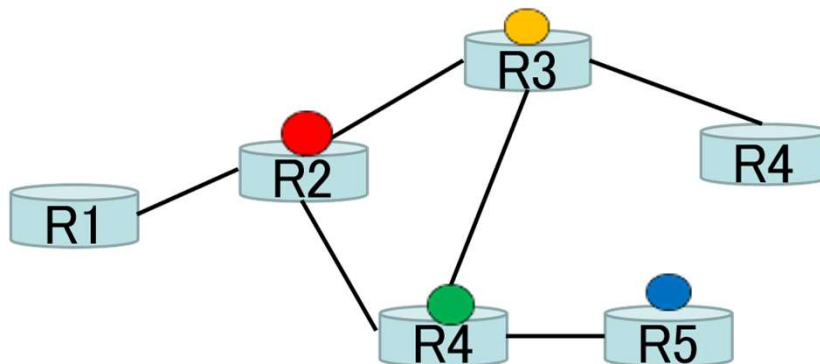
- 全てのコンテンツのノードへの配置状態

■ コンテンツ配置単位:

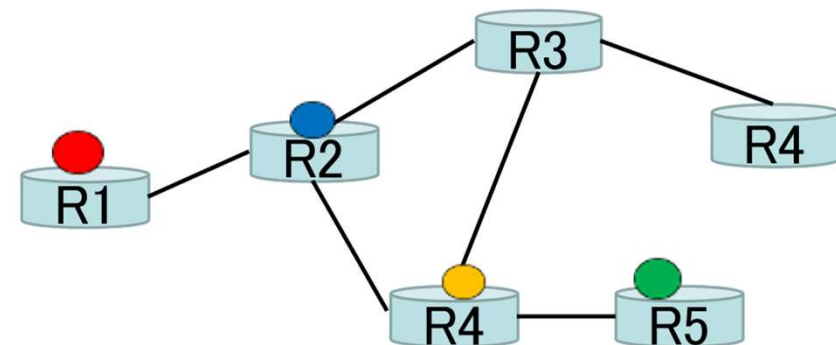
- TLD (Top level domain)ごとに分けたコンテンツ集合
- TLDが“com”と“net”はSLD (Second level domain)ごとに分けたコンテンツ集合

➡全コンテンツの中で1%以下になるように配置単位を分割

例: g_1



g_2



評価条件

■ 適応度関数

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

■ E_a : 平均FIBサイズ, L_a : 平均リンク負荷, C_L : リンク負荷の変動係数

R_c : コンテンツ可用性喪失値

■ 世代ごとに正規化 $\Rightarrow E'_a, L'_a, C'_L, R'_c$

■ 重み w_1, w_2, w_3, w_4 は均等に0.25に設定

■ 世代数 $G = 10$, 遺伝子数 $I = 250$ 個

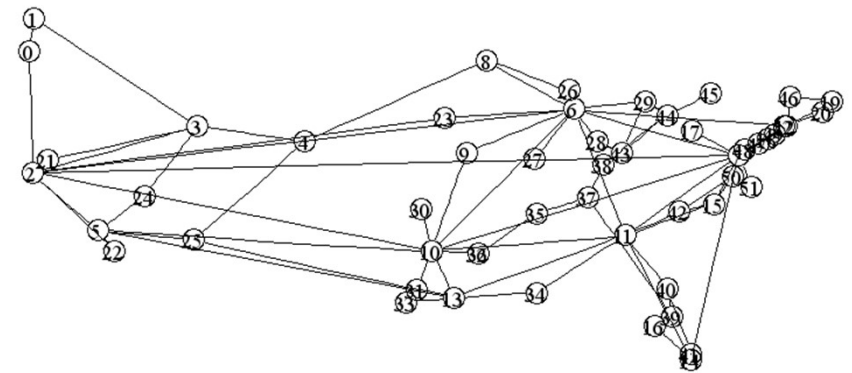
■ トポロジ: Allegiance Telecom

■ 単一ASを想定

■ Hub & Spoke型のトポロジ

■ 一部ノードが高次数

■ 高次数ノード同士がリンクで繋がる



Allegiance Telecom

評価指標

■ リンク負荷

$$L = \sum_{f_{sd} \in F_l} r_p(s) \varepsilon(d)$$

- f_{sd} : ノードsd間のフロー
- F_l : リンクを経由するフローの集合
- $r_p(s)$: 要求元ノードsの人口比率
- $\varepsilon(d)$: コンテンツ要求先ノードdの要求比率

■ 要求コンテンツ

- 12,010個のURLを想定
- 各ノードから各コンテンツが1度要求されるときを想定
 - コンテンツはアクセス比率を保持
 - 各ノードからの要求は人口比を考慮

■ NDNの特徴であるルータでのキャッシュは考慮しない

比較手法

■ Original

- 再配置なし
- 従来のオリジンサーバからコンテンツを配信

■ Naive greedy:

- ネットワークの中心から人気の高いコンテンツを再配置

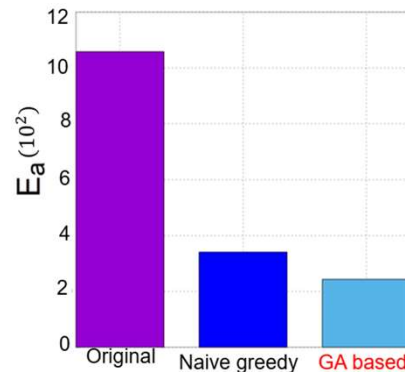
■ GA based :

- 提案方式

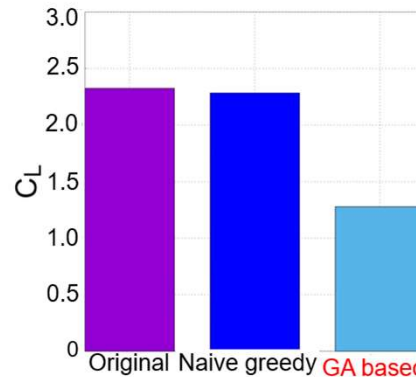
性能評価（1/2）

■ 結果

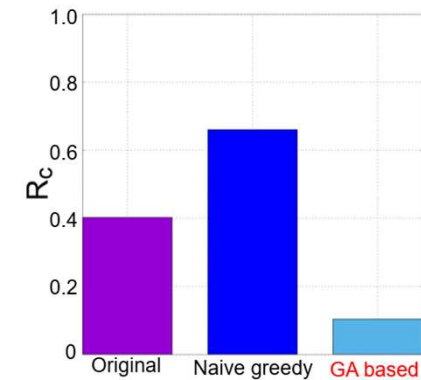
■ 負荷集中を抑制しながらFIBサイズを低減



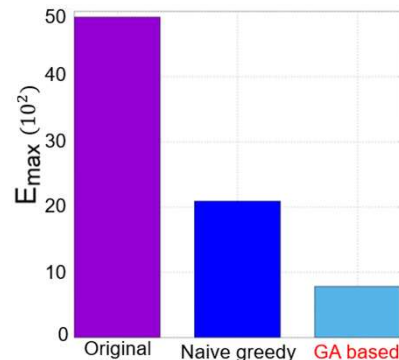
平均FIBサイズ



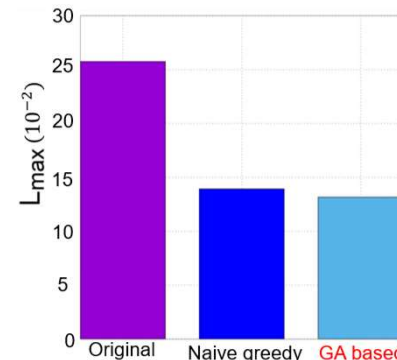
リンク負荷の変動係数



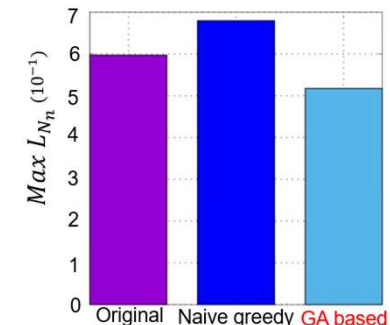
可用性喪失値



最大FIBサイズ



最大リンク負荷



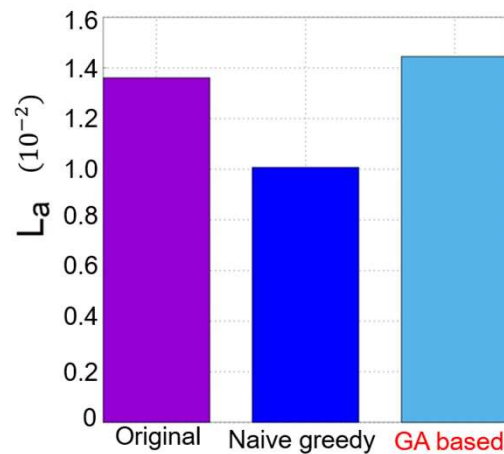
最大ノード負荷

- 遺伝的アルゴリズムによってコンテンツを複数ノードに分散させながらFIBサイズを低減させる配置を実現
- 特定ノードや特定リンクに発生する負荷を軽減

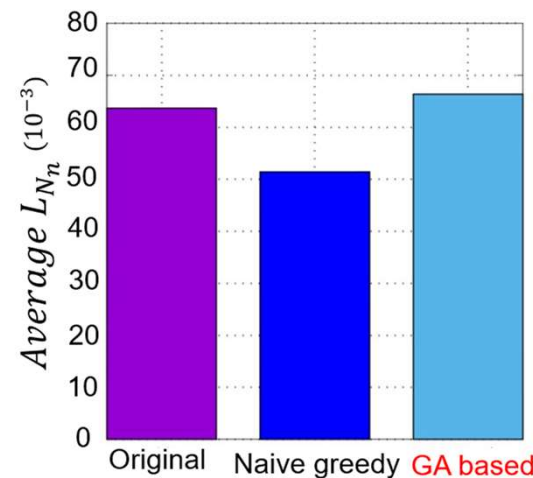
性能評価（2/2）

■ 結果

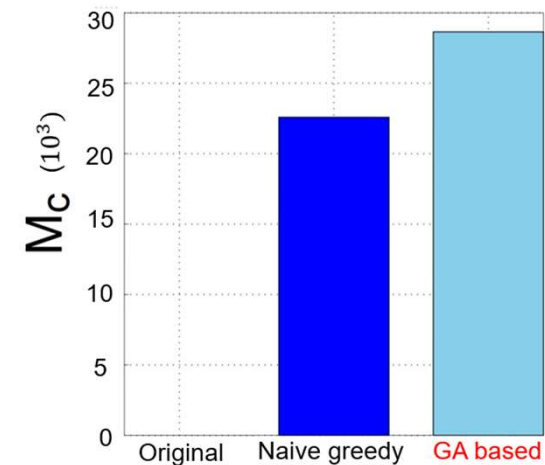
- 平均リンク負荷、平均ノード負荷は増加
- 移動コストは増加



平均リンク負荷



平均ノード負荷



コンテンツ移動コスト

- コンテンツを分散配置をしたことでコンテンツ取得に必要なホップ数が増加
 - 特定ノードや特定リンクに生じる負荷は低下するため可用性は向上
- ネットワーク全体に配置することで移動コストは増加

移動コストを考慮したGAによるコンテンツ配置

■ 適応度関数

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

- E_a : 平均FIBサイズ, L_a : 平均リンク負荷, C_L : リンク負荷の変動係数

R_c : コンテンツ可用性喪失値, M_c : コンテンツ移動コスト

- 世代ごとに正規化 $\Rightarrow E'_a, L'_a, C'_L, R'_c, M'_c$

- 重み $w_1 = 0.1, w_2 = w_3 = w_4 = 0.05, w_5 = 0.75$ に設定 (W3)

■ 評価条件

- 世代数 $G = 10$, 遺伝子数 $I = 250$ 個

- トポロジ: Allegiance Telecom

- 単一ASを想定

- 比較方式

- Original

- 再配置なし

- Naive greedy:

- ネットワークの中心から人気の高いコンテンツを配置

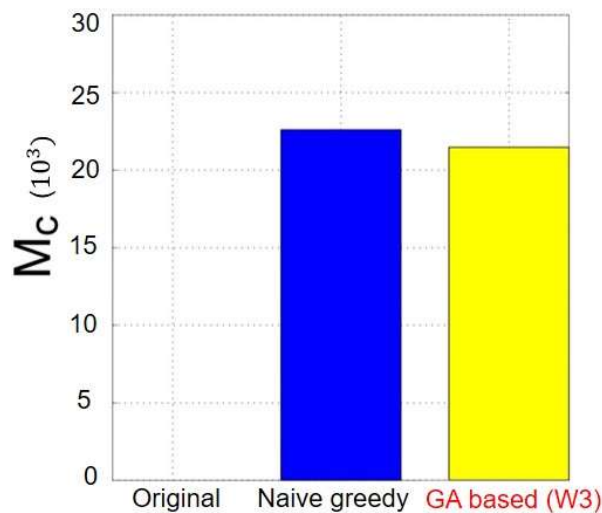
- GA based :

- 提案方式

移動コストを考慮したGAによるコンテンツ配置

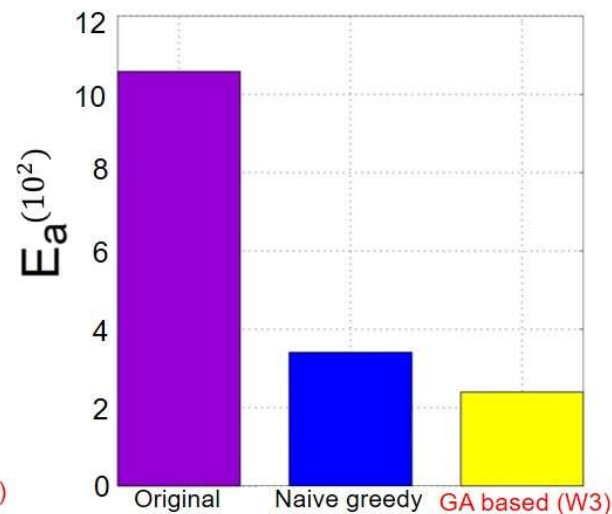
■ 結果

- 移動コストとFIBサイズを**低減**
- Naive greedyと比較して約5%の低減
 - Hub & Spoke型トポロジは次数が高いHubノードをもつ
 - 再配置に必要な移動コストは小さい
 - GA basedは負荷分散を同時におこなうため高い移動コストが発生



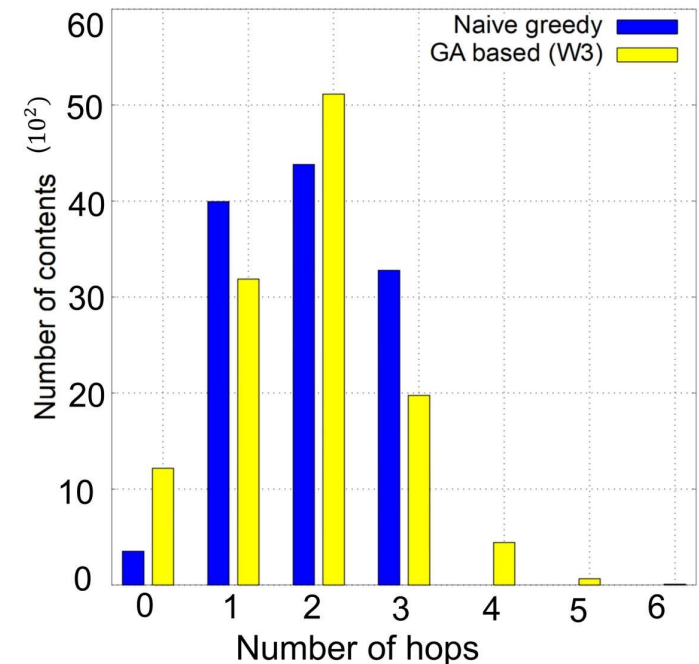
(a) Moving cost

移動コスト



(b) Average FIB size

平均FIBサイズ



オリジナルの移動のホップ数分布

まとめ

- NDNのFIBサイズ低減とネットワークの負荷集中抑制を目的に遺伝的アルゴリズムを適用したコンテンツ配置を提案
 - 既存のコンテンツ配置制御法では負荷集中の抑制について考慮されていない
 - ネットワーク多くの要素を踏まえたコンテンツ配置はNP困難
- 提案方式ではコンテンツを分散配置し、負荷集中の抑制とFIBサイズの低減を同時に実現
 - 転送数増加によりネットワーク全体の負荷は増加するが、負荷分散の実現により障害発生頻度が低下するため可用性向上
- 課題
 - 移動コストのさらなる低減
 - 動的環境での評価が必要