

令和6年度 秋学期 卒業研究3 (BI)
学士論文

題目 AnycastCDNにおけるキャッシュ
集合を限定する効果の実測評価

指導教員 上山憲昭 教授

立命館大学 情報理工学部 セキュリティ・ネットワークコース

学籍番号 26002103558

正井楓人

令和7年1月31日

概要

Anycast CDN は、IP Anycast と呼ばれるルーティング技術を用いた CDN である。複数のキャッシュサーバ (CS) に同一の IP アドレスを割り当て、Border Gateway Protocol (BGP) を用いてユーザからのリクエストを地理的に最も近いと推定される CS に自動的にルーティングする。Anycast における配信サーバの選択は、BGP のルーティングポリシー依存するため、必ずしも地理的に最も近い CS に誘導されるとは限らない。これを解決するため、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて少数の CS で構成された複数のリングを構築する手法が提案されている。本稿では、GA を用いて構築した少数 CS から構成された複数の CS セットの性能を、多数の CS で構成された単一 CS セットを持つ既存手法と比較評価した。評価指標として、Round Trip Time (RTT) を用い、最適な CS が選択される状況と、不適切な CS が選択される状況の両方を考慮した。GA を用いて、AS 数がそれぞれ 5, 10, 15 となる 20 の CS セットを持つ 3 種類の Anycast CDN を構築し、既存手法として、GA で構築した全てのリングを結合して単一の CS セットを構築した。最適な CS が選択される状況下では、既存手法は GA を用いた手法と比較してより良い性能を示した。しかし、GA を用いた手法においても、90 パーセンタイル値で RTT が 80ms 以下を実現し、良好なパフォーマンスを示した。さらに、不適切な AS が選択される可能性を考慮した評価を行い、不適切な AS が選択される確率 p を変化させてシミュレーションを行った。その結果、リングを構成する AS 数が 5 のときでは $p = 0.35$ で、10 のときは $p = 0.31$ 、15 のときは $p = 0.25$ で、GA を用いた手法が既存手法より優位となった。これらの結果から、GA を用いた手法は、少数の CS 数で、既存手法と同等以上の性能を達成できる可能性があることが示唆された。

目次

概要	1
第 1 章 序論	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
第 2 章 関連研究	5
2.1 Anycast 配信の非効率性	5
2.2 Anycast の配信拠点数	5
2.3 Anycast の性能評価	6
第 3 章 遺伝的アルゴリズムによるリング構成	7
3.1 GA を用いたリング構成方法	7
3.2 コンテンツのリング割り当て方法	8
第 4 章 提案方式	9
4.1 比較方式	9
4.2 RTT の測定方法	9
4.3 配信 AS の決定方法	10
4.4 不適切な CS 選択の考慮	10
4.5 コンテンツの遅延時間計算	11
第 5 章 性能評価	12
5.1 評価条件	12
5.2 最適な AS 選択における性能評価	14
5.3 不適切な AS 選択を考慮した性能評価	16
第 6 章 まとめ	18
謝辞	19

第1章 序論

1.1 研究の背景

インターネットを通して膨大なコンテンツが消費される現代において、Content Delivery Networks (CDN) はコンテンツ配信を効率化する上で重要な役割を担っている。CDN は、地理的に分散配置された CS 群を活用することで、ユーザに近い CS からコンテンツを配信する。これにより、配信遅延時間の短縮、ネットワークトラフィックの削減、オリジンサーバへの負荷分散を実現し、高速かつ安定的なコンテンツ配信を可能にする。CDN において、配信サーバの選択はパフォーマンスに大きな影響を及ぼす。そのため、配信要求に対して適切な配信サーバを選択することが重要となる。

Anycast CDN は、IP Anycast と呼ばれるルーティング技術を用いた CDN である。複数の CS に対して同一の IP アドレスを割り当て、Border Gateway Protocol (BGP) を用いてユーザからのリクエストを地理的に最も近いと推定される CS に自動的にルーティングする。BGP は自律システム (AS) 間のルーティングプロトコルであり、Anycast CDN のサーバ選択は BGP のルーティングポリシーに大きく依存する [4]。そのため、必ずしも最適な CS に誘導されるとは限らず、20%のユーザが最適ではないサーバに誘導されるという報告もある [3]。また、Anycast を構成するサーバ数を増やすだけではパフォーマンスが改善されないことも報告されている [6]。Microsoft の Anycast CDN では、異なる規制要件に対応するため、それぞれに固有の Anycast アドレスが割り当てられたリングと呼ばれる CS セット¹ を複数保持する [2]。ユーザのリクエストは、アプリケーションの規制要件を満たし、かつ最も多くのキャッシュサーバを含むリングに常に誘導される。しかし、この方式では、コンテンツの人気に偏りがあるにも関わらず、それを考慮せずに CS セットを選択するため、キャッシュ効率の低下が懸念される。

これらの課題に対して、CS を内包した AS で構成したリングを特定の地域からの需要に偏っているコンテンツに対して遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することで、空間的局所性を考慮して少数 CS からリングを構成する方法がある [1]。しかし、本手法は各コンテンツを適切なリングに割り当てた際の需要カバー率でしか評価されておらず、実際のネットワークでどのような性能を発揮するかは未知数である。

1.2 研究の目的

CDN はサーバとの地理的距離を近くすることで配信遅延時間の短縮を目的としている。そのため、ユーザとサーバ間の通信の往復にかかる時間を測定するラウンドトリップタイム (RTT) は、Anycast の性能を評価する指標として使用されている。

¹本稿でも以後、CS セットのことをリングと呼ぶ。

本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いて空間的局所性を考慮した少数 CS で構成された複数のリングを持つ Anycast CDN がインターネット上に展開されていることを想定し、RTT を用いて性能を評価する。さらに、多数の CS で構成された単一のリングを持つ従来型の Anycast CDN との比較を行い、遺伝的アルゴリズムを用いた手法の有効性を検証する。

第2章 関連研究

2.1 Anycast 配信の非効率性

Anycast 配信の課題として、その非効率性が指摘されている。Calder らは、Anycast-based CDN (anycast CDN) は、CS 選択を BGP に依存することで DNS-based CDN と比較して容易な運用を可能とするが、配信 CS 選択を正確に制御することができない課題を指摘している [3]。これにより、最適なサーバへのルーティングと比較して 20% のリクエストで遅延時間が少なくとも 25ms 遅くなり、測定値の 10%未満は 100ms 以上遅くなることを報告している [3]。また、ユーザから地理的に最も近いサーバと実際にルーティングされたサーバとの距離の差の測定において、55%のユーザで 0km と地理的に最も近いサーバにルーティングされ、75%で 400km 以内、90%で 1375km 以内のサーバにルーティングされる [3]。これから、10 15%のユーザが遠方の CS にルーティングされることが Anycast のパフォーマンス低下の原因の一つとしている [3]。Anycast 配信では、サーバまで複数の経路が利用可能なとき、不適切な経路選択の影響を受ける [6]。BGP は到達可能なサーバの数や品質に関する情報を提供しないため、ISP が同等の優先度を持つ複数の経路から選択する際に最適でない経路を選択する可能性がある。また Li らは、BGP は到達可能なサーバの数や品質に関する情報を提供しないことから、サーバまで同等の優先度を持つ複数の経路が存在するとき、ISP によって最適でない経路を選択する可能性に言及している [6]。実際、DNS サーバから収集した 1 年間のクエリデータから負荷分散と配信遅延について分析し、サーバ負荷に偏りがあることと多くのリクエストにおいて不必要に長い距離を移動し、余分に 5000km 以上移動しているクエリが多数存在することを報告している [6]。

2.2 Anycast の配信拠点数

BGP による最適でない経路選択の影響を軽減するため、大規模な Anycast を展開する事業者は何百もの CS を配置する [7]。Anycast 配信では、最適なサーバが選択されないとき、多くの場合で次に最適なサーバが選択されることが分かっている [3]。しかし、Anycast において、CS 数の増加は必ずしもパフォーマンスの向上につながるわけではない。Schmidt らの研究では [5]、DNS ルートサーバにおいて、配信拠点数の多いルートサーバが、最適な拠点にルーティングされなかったときの遅延時間の増加という点で優れていることを示している。一方で、配信拠点数の多いルートサーバでは、配信拠点数が少ないルートサーバと比べて最適な拠点にルーティングされる確率が低下することも示されている。また、戦略的に配置された 8 個の配信拠点を持つ C ルートサーバは、18 倍の配信拠点を持つ L ルートサーバとほとんど同等の RTT を示すことが指摘されている [5]。Li らは [6]、各 DNS ルー

トサーバにおける配信距離の測定を行い、F ルートサーバでは測定期間中に 77 の配信拠点が追加されたにも関わらず、配信距離に変化はなかったことを報告している。

2.3 Anycast の性能評価

Anycast の性能は、サービスの可用性や応答速度などユーザエクスペリエンスに直接影響を与える。そのため、Anycast サービスを提供者は自らのサービスの性能を把握し、必要に応じて改善を図ることが重要となる。

Anycast の性能評価に関する研究は数多く存在し、これまで様々な指標が用いられてきた。代表的な指標としては、ユーザとサーバ間の通信における遅延時間や、ユーザとサーバ間の地理的な距離などが挙げられる。

Evang らは、多数の Anycast の性能を評価した文献調査の結果から、Anycast の品質において、遅延時間、ユーザとサーバの地理的な距離、およびトラフィックバランスの 3 つが重要であるとしている [7]。そして、これら 3 つの品質を定量化することで、Anycast の評価と調整として利用可能な、Average Latency, Threshold Latency, Weighted Geographical Balance の 3 つの指標を提案している。Average Latency は、ユーザから最も近いサーバまでの平均遅延時間を表す指標である。Threshold Latency は、一定の遅延時間閾値を超えるユーザの割合を表す指標であり、BGP tuning の性能評価時には 100ms に設定していた。Weighted Geographical Balance は、各サーバに割り当てられた地理的な範囲内において、実際にそのサーバにルーティングされるクライアントの割合を重み付けして平均化することで、Anycast サービス全体の地理的な負荷分散のバランスを評価する指標である。Evang らは、これらの指標を用いて BGP チューニングが Anycast のパフォーマンスに与える効果を評価し、3 つの指標と BGP チューニングを活用することで、Anycast サービス提供者がネットワークを最適化できると結論づけている。

第3章 遺伝的アルゴリズムによるリング構成

本稿で性能を評価する遺伝的アルゴリズム (GA) を用いたリング構成手法は, [1] で提案されている手法が基となっている. そのため, 本章では本手法について紹介する.

3.1 GA を用いたリング構成方法

遺伝的アルゴリズムは生物の進化過程にヒント得た, 最適化アルゴリズムである. [1] の筆者らは, 効率的に複数のリングを生成する手法として遺伝的アルゴリズムを採用し, 地理的に分散した AS を組み合わせてリングを構成する. 各 AS は CS を内包しており, リングは地理的に分散した CS 群で構成される. 具体的には, 複数の AS から構成されたリングの集合を遺伝子とし, 各遺伝子に対して平均需要カバー率を適応度として計算する. 需要カバー率は, 各コンテンツに対して需要上位 5ヶ国における需要割合を基に算出される. コンテンツが適切なリングに割り当てられたとき, コンテンツの需要上位 5ヶ国の中で自国に AS が存在する国について, 需要上位 5ヶ国での需要割合の和が 1 となるように正規化した需要割合を合計したものである. ここで, 需要カバー率および適応度の計算に用いた変数の定義を表 3.1 に示す.

表 3.1: Defining Variables

M	コンテンツ数
$T_{m,i}$	コンテンツ m の国 i における需要割合
$B_{m,i}$	コンテンツ m の需要の上位 i 個の国の集合
$r_{m,i}$	コンテンツ m の需要が i 番目の国
$R_m(g)$	遺伝子 g における, コンテンツ m が割り当てられたリングの国集合

このとき, 遺伝子 g におけるコンテンツ m の需要カバー率 $C_m(g)$ と, 遺伝子 g の適応度 $A(g)$ は次式で定義する.

$$C_m(g) = \frac{\sum_{i \in (R_m(g) \cap B_{m,k})} T_{m,i}}{\sum_{j=1}^5 T_{m,r_{m,j}}} \quad (3.1)$$

$$A(g) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M C_m(g) \quad (3.2)$$

また, 面積が広い国において, 1カ所のサーバで全てのユーザをカバーすることは現実的でない. そのため, 面積上位 6ヶ国は 8つのエリアに分割し, エリアごとに需要カバー率を

計算する. エリア i の人口比を P_i とするとき, 分割された国の需要カバー率 C'_m を次で定義する.

$$C'_m(g) = \sum_{i \in (R_m(g) \cap B_{m,k}) \text{ and } i \in j} P_j \times T_{m,i} \quad (3.3)$$

本方式は, 各コンテンツの需要上位 5ヶ国の国名と, 各国の需要が既知であることを前提としている. GA によるリング構成アルゴリズムを, Algorithm1 に示す. 本アルゴリズムでは, 需要上位 5ヶ国で需要比率が 90%以上となるコンテンツを対象としている. 各コンテンツの需要上位 5ヶ国の国々に対し, CS を配置したリングを構成することで大部分のユーザに効率的なコンテンツ配信を実現する.

Algorithm 1 Ring construction algorithm using GA

- 1: 与えられた N と k に対して, ランダムに l 個の初期遺伝子を作成
 - 2: 適応度 i 位の遺伝子を選択する確率 p_i を各遺伝子の適応度に基づき $p_i = a \times b^{(i-1)}$ で計算 (a と b は $0 < a < 1$, $0 < b < 1$ を満たす定数で指数関数の確率分布のパラメタ)
 - 3: 選択確率を考慮し, 確率的トーナメント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様交叉処理を実行し, y 個の子遺伝子を生成
 - 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リングとして選択
-

3.2 コンテンツのリング割り当て方法

GA では遺伝子を平均需要カバー率を適応度として評価する. 平均需要カバー率は, 各コンテンツが最適なリングに割り当てられたときの需要カバー率の平均をとった値であり, 各コンテンツを最適なリングに割り当てて必要がある. コンテンツの最適なリングへの割り当ては需要カバー率を用いる. GA で構成された全てのリングに対して需要カバー率を計算し, 最も需要カバー率が高かったリングを配信リングとする. また, どのリングに割り当てても需要カバー率が 0 となる場合は例外として, コンテンツの需要上位国と構築されたリングに存在するすべての国との間で地理的距離を計算し, 地理的に最も近い国が属するリングを選択する.

第4章 提案方式

本稿では、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて構成された複数のリングを持つ Anycast CDN を RTT を用いて性能評価する。加えて、従来型の Anycast CDN との比較を行う。しかし、これら二つの Anycast CDN は実際のインターネット上には展開されていないため、直接的に RTT を計測することはできない。そのため、実際のインターネット上に展開されていない Anycast CDN について RTT を用いた性能評価方法について提案する。

4.1 比較方式

本稿では、GA を用いて少数の CS から構成された複数のリングからなる Anycast CDN と、既存手法の多数の CS で構成された単一のリングを持つ Anycast CDN を比較する。GA では、リングの AS 数を各 5, 10, 15 とした、20 のリングからなる 3 種類の Anycast CDN を構成する。構成 AS 数は、戦略的に配置された 8 個の配信拠点を持つ C ルートサーバのパフォーマンスが良好であったため [5], AS 数は 10 とそれに ± 5 した 5, 10, 15 と設定した。また、リング数については、[1] らの需要カバー率による性能評価から、リング数 20 において良好な性能を示していたことによる。既存手法は、GA で構成したリング集合を 1 つのリングに結合したものと定義する。そのため、GA の設定ごとに異なる既存手法のリングが作成される。なお、GA で選択される AS は重複する可能性があるため、既存手法の構成 AS 数は GA のリング数と構成 AS 数の積よりも小さくなることがある。

4.2 RTT の測定方法

本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いてリングを構成する手法について、RTT を用いて評価することを目指している。RTT の測定は、ヨーロッパ、中東、中央アジアにおける地域インターネットレジストリである RIPE NCC が提供するインターネット測定プラットフォームである RIPE Atlas を用いて行う [8]。RIPE Atlas は、世界中に Probe と呼ばれる多数の測定ポイントを有しており、広範囲なネットワーク環境における RTT 測定が可能である。Probe をユーザとみなし、コンテンツの需要上位国にある Probe からルーティングされると想定される AS に向けて Ping コマンドを実行することで RTT を測定する。Probe は、国の面積が上位 6ヶ国であるときはその国の中から 50 個の Probe が、それ以外の国では 20 個の Probe がランダムで選択され、各 Probe から 3 回の ping コマンドが実行されるように設定する。このとき、国内にある Probe 数が 50 (または、20) に満たないときは、その国にある最大数の Probe で測定が行われる。また、RIPE Atlas では、宛先に IP アドレスが必要とされるため、測定の実行には AS の IP アドレスを取得する必要がある。そのため、RIPE NCC が提供する Data API の Announced Prefixes を使用して [8], AS 番

号から AS のプレフィックスを取得した. インターネットにはセキュリティ上の理由などから, ICMP パケットをブロックするサーバが多数存在する. そのため, 取得した IP アドレスに対して ping コマンドを実行し, 応答があった IP アドレスの中から 3 つを AS の IP アドレスとした.

4.3 配信 AS の決定方法

RTT の測定にあたって, コンテンツが配信される AS を選択する必要がある. 本稿では, リング内の AS から最適な AS が選択されることを想定して, RTT の計測を行う. ここでいう最適な AS は, アルゴリズム 2 に沿って決定する.

Algorithm 2 Optimal AS Selection Algorithm

```

1: リング内で需要国と同じ国の AS を探す
2: if 同じ国の AS が存在する then
3:   if AS が 1 つだけ存在する then
4:     その AS を最適な AS として選択
5:   else
6:     複数の AS について RTT を測定
7:     RTT が最小の AS を選択
8:   end if
9: else
10:  リング内の全ての AS との距離を計算
11:  距離が最小の AS を選択
12: end if

```

2 点間の地理的距離 d は次式で計算する. ただし, r は地球の半径, ϕ_1, ϕ_2 は 2 点の緯度, λ_1, λ_2 は 2 点の経度を示す.

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (4.1)$$

4.4 不適切な CS 選択の考慮

Anycast CDN では, 不適切な CS が選択されることが課題であり, これを考慮する必要がある. 本稿において不適切な CS の選択は, コンテンツ需要国と同じ国に属する AS がリング内に複数存在するときのみ発生すると仮定する. また, 不適切な選択によって選ばれる AS は, コンテンツ需要国と同じ国に属する複数の AS の中から RTT が最大となる AS に誘導されるとする. Anycast では不適切なルーティングが発生しても, 多くは次に最適なサーバが選択されることが多い [3]. そのため, 不適切なサーバ選択においてリング内の同じ国の AS が選択される方式をとる. 本来, リング内の全ての AS がルーティング先の候補となるため, リング内の全ての AS を対象に不適切な AS 選択を考慮する必要がある. しかしこの場合, コンテンツが割り当てられたリングの全 AS に対して計測を行う必要が

あり、特に既存手法では必要な計測数が膨大となる。一方、本手法では計測数が抑えられる反面、不適切なサーバ選択は国内のみに限定されるため、遅延時間に大きな影響を与える遠方の AS が選択されない。そのため、リングにコンテンツ需要国と同じ国に属する AS が複数存在するとき RTT が最大となる AS を選択することで、遠方の AS が選択されることを考慮する。

4.5 コンテンツの遅延時間計算

計測した RTT データを用いてコンテンツの遅延時間およびコンテンツの平均遅延時間を算出し、その値を性能評価に用いる。本稿では、コンテンツの需要上位 5ヶ国で需要比率が 90%を超えるコンテンツの国別の需要比率データを使用している。各コンテンツに対して、需要上位 i 番目の国から最適な AS までの RTT と不適切な AS までの RTT を取得し、それぞれが発生する確率を掛け合わせて合計する。これは、需要上位 i 番目の国における遅延時間となる。さらに、需要比率の多い国の影響を高めるため、需要上位 5ヶ国の需要比率の合計が 1 になるように正規化した値で重みづけを行う。コンテンツの需要上位 5ヶ国の重みづけされた遅延時間を合計することでコンテンツの遅延時間を計算する。また、コンテンツの平均遅延時間は各コンテンツの遅延時間の平均と定義する。つまり、コンテンツ m の需要 i 番目の国を $r_{m,i}$ 、また $r_{m,i}$ から最適な AS までの RTT を $O_{m,i}$ 、不適切な AS までの RTT を $S_{m,i}$ 、コンテンツ m における $r_{m,i}$ の需要割合を $T_{m,r_{m,i}}$ 、不適切な AS が選択される確率を p とするとき、コンテンツ m の遅延時間 L_m は次で定義する。

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^5 [(1-p)O_{m,i} + pS_{m,i}] T_{m,r_{m,i}}}{\sum_{j=1}^5 T_{m,r_{m,j}}} \quad (4.2)$$

また、コンテンツ数を M としたとき、リング集合 R におけるコンテンツの平均遅延時間 $C(R)$ は次で定義する。

$$C(R) = \sum_{m=1}^M L_m \quad (4.3)$$

第5章 性能評価

5.1 評価条件

本稿では, 遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて少数 CS から構成された複数のリングを RTT による性能評価と既存手法との比較を行う. そのため, GA を用いてリングの AS 数を各 5, 10, 15 とした, 20 のリングからなる 3 種類の Anycast CDN を構築する. GA でリングを構成するにあたって, コンテンツの需要上位 5ヶ国の国名と, 各国の需要割合, 及びリングを構成する AS のデータが必要となる. コンテンツとして, Similar web のサイト [10] から, 2024 年の 6 月から 8 月における全世界の人気 Web サイトランキングにて, 需要上位 5 カ国で需要比率が 9 割以上を占める 261 個の Web ページの国ごとの需要比率のデータを取得した. また, リングを構成する AS は, CAIDA の公開データセット [9] から, AS ランキングに基づき上位 300 個の AS トポロジと, コンテンツ需要上位国に属する AS が最低一つは含まれるように, 追加で 50 個の AS 情報を収集した. GA ではパラメータを, 世代数 $G = 100000$, 初期遺伝子数 $l = 300$, 突然変異率 $m = 0.1$ と設定する.

本稿で構築した Anycast CDN について, GA を用いた手法とそれと対応する既存手法のリング数 (N) と構成 AS 数 (k) の一覧を表 5.1 に示す.

表 5.1: Configuration List

	N	k	N	k	N	k
GA Method	20	5	20	10	20	15
Existing Method	1	84	1	154	1	198

また, 3 種類の Anycast CDN のサーバの地理的分布をそれぞれ図 5.1 - 5.3 に示す. GA によって選択された AS が地理的に分散していることを示している.

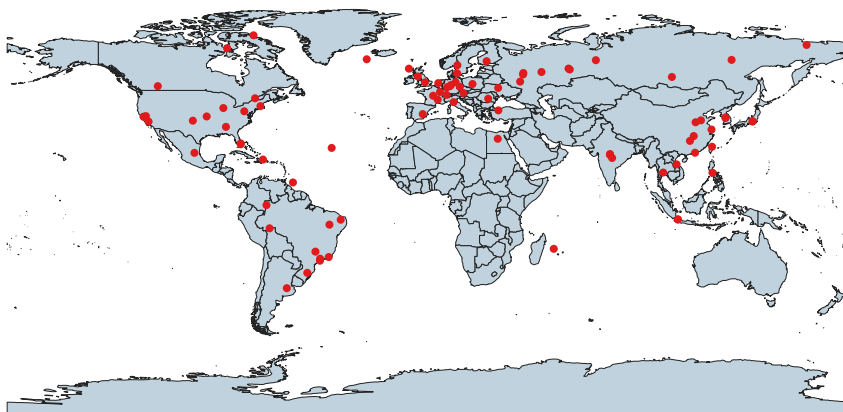


図 5.1: Graphical distributions of ASes used in N20 k5

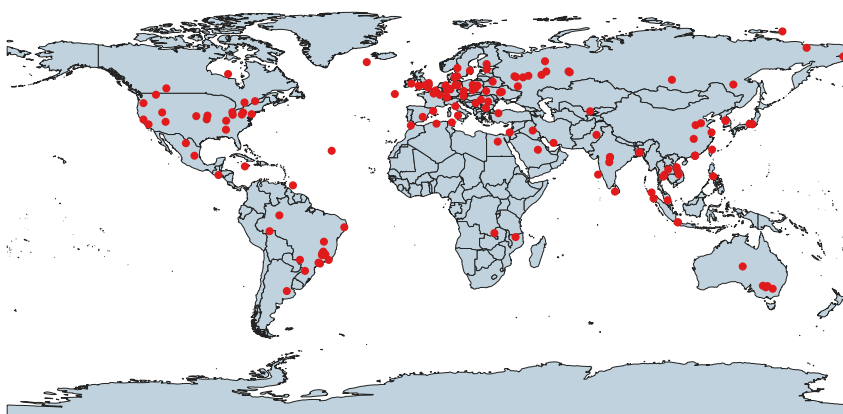


図 5.2: Graphical distributions of ASes used in N20 k10

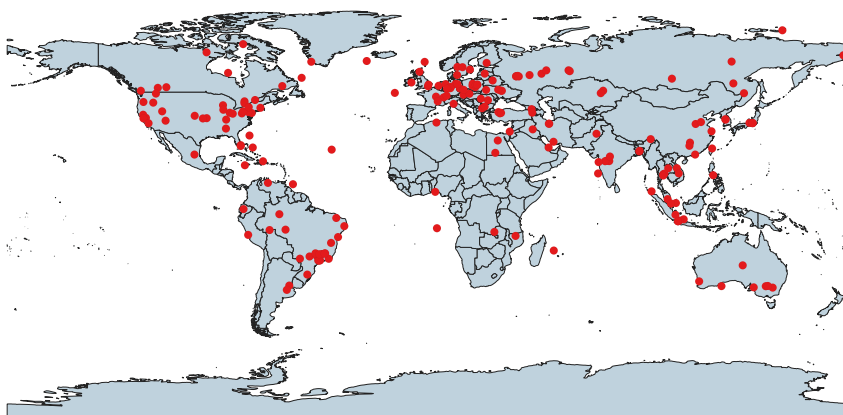


図 5.3: Graphical distributions of ASes used in N20 k15

5.2 最適な AS 選択における性能評価

最適な AS が必ず選択される場合において, GA を用いた手法と既存手法を比較する. 表 5.2 は, 3 種類の Anycast CDN とそれに対応する既存手法の 平均コンテンツ遅延時間の 一覧である.

表 5.2: RTTs in Optimal Selection

	<i>N20_k5</i>	<i>N20_k10</i>	<i>N20_k15</i>
GA Method	46.95 ms	45.94 ms	39.86 ms
Existing Method	29.70 ms	28.47 ms	24.74 ms

GA を用いた手法とそれに対応する既存手法との比較では, すべてにおいて既存手法のパフォーマンスが優れている. また, GA 内, 既存手法内の比較においても, 構成 AS 数の増加とともにパフォーマンスは向上し, 構成 AS 数が最大の *N20_k15* の組が優れたパフォーマンスを示している. *N20_k5* と *N20_k10* の比較において, GA と既存手法ともにパフォーマンスの向上は限定的である. 一方で, *N20_k10* と *N20_k15* では, GA と既存手法ともに大幅にパフォーマンスが向上している. この違いは最適な AS の選択において, リング内に需要国と同じ国の AS が複数存在するとき RTT が最小の AS を選択していることによる. リングの構成 AS 数が多い *N20_k15* では, リングに同じ国の AS が複数存在している確率が高いため, 大幅にパフォーマンスが向上していると考えられる.

次に各コンテンツごとの RTT の累積分布を図 5.4 - 図 5.6 に示す. 既存手法においては条件に関係なく, ほとんど全てのコンテンツの RTT が 50ms 以下と, 非常に優れた性能を示している. 一方で, GA を用いた手法で 50ms を下回ったのは, *N20_k5* で 62%, *N20_k10* で 68%, *N20_k15* で 72%と, 既存手法と比較すると性能は劣る. しかし, *N20_k10* と *N20_k15* の 2 つについては, 100ms を超えるコンテンツが 5%未満に抑えられており, 良好な性能を示している. *N20_k5* については, 構成 AS 数の少なさもあり, 他の 2 つの条件と比較すると性能は劣る. ただ, 90 パーセンタイルにあたるコンテンツの RTT は, *N20_k5* で 70ms, *N20_k10* で 80ms, *N20_k15* で 74ms と, *N20_k5* が最も優れた性能を示した. このことから, 構成 AS 数が少ない場合においても, ほとんどのコンテンツで良好な性能を発揮することが分かる. また, 構成 AS 数を増やすことは, 遅延増大への抑制効果が強いことが分かる.

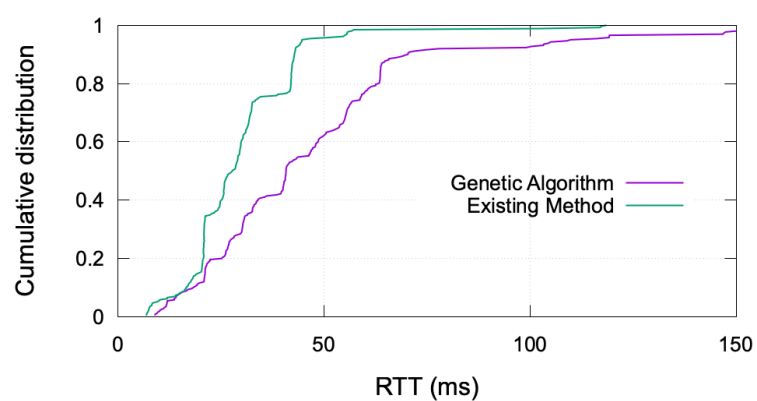


図 5.4: Cumulative Distribution of Website Latency in N20 k5

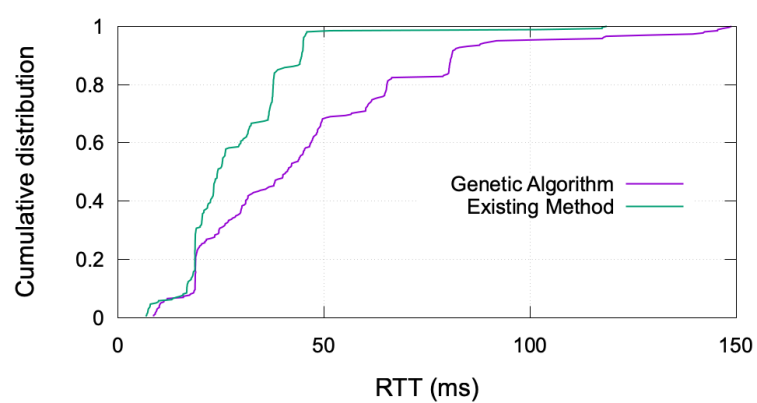


図 5.5: Cumulative Distribution of Website Latency in N20 k10

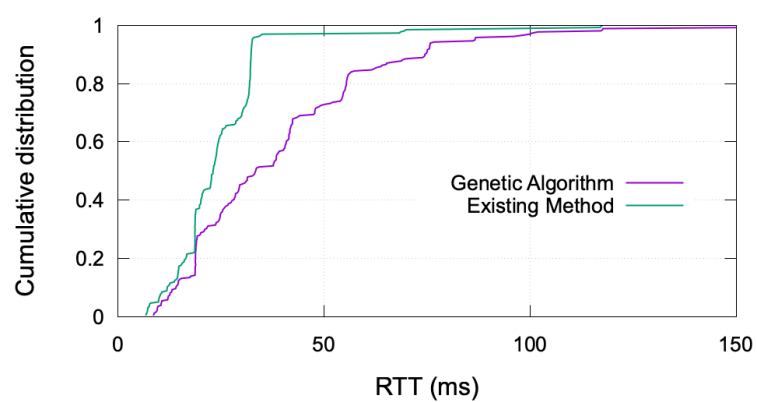


図 5.6: Cumulative Distribution of Website Latency in N20 k15

5.3 不適切な AS 選択を考慮した性能評価

まず, 不適切な AS が選択される確率 $p = 1.0$ となるときの, GA を用いた手法と既存手法を比較する. 表 5.3 は, 3 種類の Anycast CDN とそれに対応する既存手法において不適切な AS が選択されるときの平均コンテンツ遅延時間の一覧である.

表 5.3: RTTs in Suboptimal Selection

	$N20_k5$	$N20_k10$	$N20_k15$
GA Method	47.97 ms	55.83 ms	63.77 ms
Existing Method	80.03 ms	96.27 ms	109.62 ms

表 5.2 と 5.3 を比較すると, 全てにおいて RTT が増大していて, 構成 AS 数が多いほどその影響が大きい. 構成 AS 数が多いほど, 良い性能の AS が含まれる確率も上がるが, 逆に悪い性能の AS が含まれる確率も上がる.

次に, 不適切な AS が選択される確率 p を 0.01 ずつ変化させたときの, 平均コンテンツ遅延時間の変化を図 5.7 - 5.9 に示す.

図 5.7 の $N20_k5$ のグラフでは, $p = 0.35$ 以降で GA が優位となる. これは, 他の 2 つと比べて最も悪い数値であった. $N20_k5$ における既存手法のサーバ数は 84 と, 他 2 つと比べて少なく, 不適切な AS 選択による影響が小さいことが影響している. 図 5.8 の $N20_k10$ のグラフは, $p = 0.31$ 以降で GA が優位となり, 全体的に $N20_k5$ と似た傾向にある. 図 5.7 と比較すると, 既存手法において不適切な AS 選択による影響が大きい. 図 5.9 の $N20_k15$ のグラフは, $p = 0.25$ 以降で GA が優位となる. 他の 2 つのグラフとは傾向が異なり, GA を用いた手法も不適切な AS 選択による影響がある. しかし, 既存手法における不適切な AS 選択による影響が深刻になるため, 結果として早い段階で GA が優位となる.

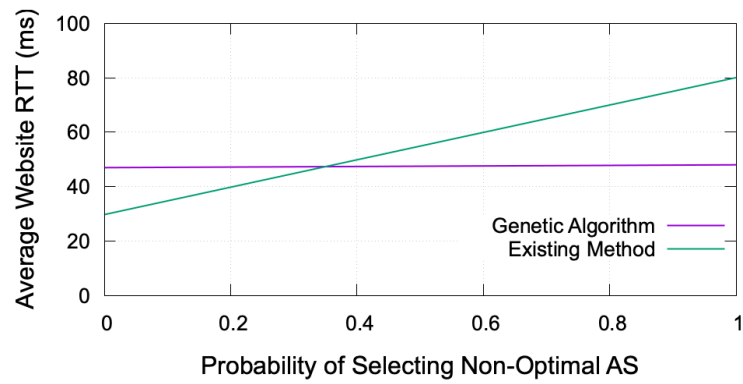


図 5.7: Average access latency of webpages against p , ratio of non-optimally selecting AS in N20 k5

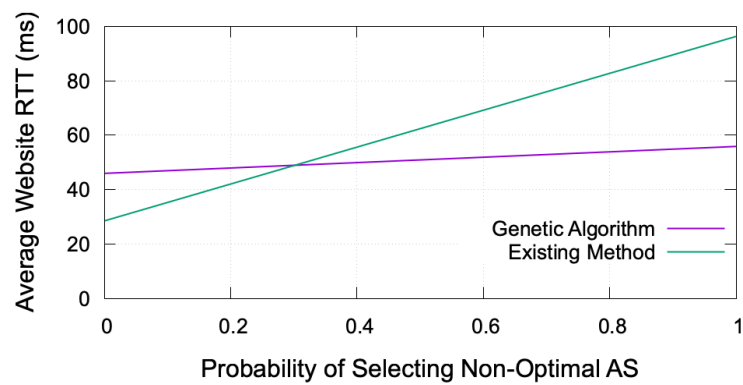


図 5.8: Average access latency of webpages against p , ratio of non-optimally selecting AS in N20 k10

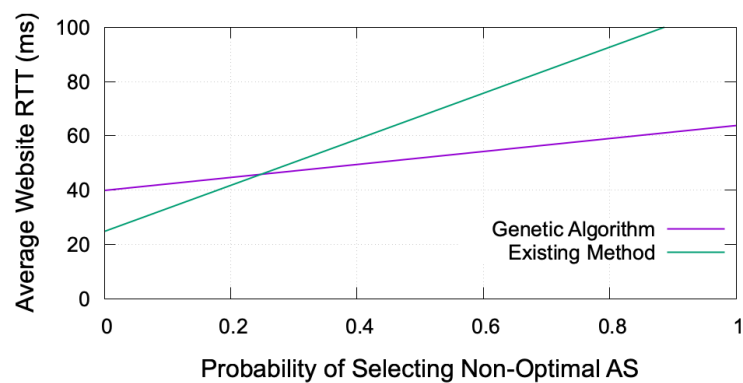


図 5.9: Average access latency of webpages against p , ratio of non-optimally selecting AS in N20 k15

第6章 まとめ

Anycast 配信では、構成 CS 数の増加に伴い適切なサーバが選択される確率が低下する課題がある。これに対して、GA を用いて少数 CS から構成された複数の CS セットを構成する方法があるが、これは実際のインターネット上で評価されていない。そこで本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いて少数 CS から構成された複数のリングの性能を RTT で評価し、多数の CS で構成された単一のリングを持つ既存手法との比較を行った。

GA では、リングを構成する AS 数がそれぞれ、5, 10, 15 となる 20 のリングで構成された 3 種類の Anycast CDN を構築し、既存手法では、GA で構築した複数のリングを結合して単一のリングを構築した。最適な AS が選択される条件下においては、既存手法は GA を用いた手法と比較してより良い性能を示した。しかし、GA を用いた手法においても、90 パーセンタイル値で RTT が 80ms 以下を実現し、良好なパフォーマンスを示した。

不適切なサーバ選択を考慮したとき、適切なサーバを選択する確率 p について、リングを構成する AS 数が 5 のときでは $p = 0.35$ で、10 のときは $p = 0.31$ 、15 のときは $p = 0.25$ で、GA を用いた手法が既存手法より優位となった。このことから、GA を用いた手法は、少数の CS 数であっても、既存手法と同等以上の性能を達成できる可能性があることが示唆された。

今後の研究においては、ユーザとサーバ間の距離による評価とリング内の全ての AS を対象に不適切なサーバ選択を考慮する予定である。

謝辞

本研究を行うに当たり，ご指導を頂いた上山教授に感謝します．また日常，有益な議論をして頂いた研究室の皆様にも感謝します．

参考文献

- [1] Chihiro Kato and Noriaki Kamiyama, Designing Server Sets for Anycast CDN Using Genetic Algorithm, IEEE ICC 2024
- [2] Homas Koch, Ethan Katz-Bassett, John Heidemann, Matt Calder, Calvin Ardi, and Ke Li., Anycast in Context: A Tale of Two Systems, ACM SIGCOMM 2021
- [3] Matt Calder, Ashley Flavel, Ethan Katz-Bassett, Ratul Mahajan, and Jitendra Padhye, Analyzing the Performance of an Anycast CDN, ACM IMC 2015
- [4] Rekhter, Yakov and Tony Li., A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 4271 (1994): 1-104
- [5] R. d. O. Schmidt, J. Heidemann, and J. H. Kuipers., Anycast latency: How many sites are enough?, PAM 2017
- [6] Zhihao Li, Dave Levin, Neil Spring, and Bobby Bhattacharjee, Internet anycast: performance, problems, & potential, ACM SIGCOMM 2018
- [7] Jan Marius Evang, Alojz Gomola and Tarik Cicic, Anycast Metrics and Performance Tuning, SoftCOM 2024
- [8] RIPE NCC web page, <https://www.ripe.net>
- [9] CAIDA web page, <http://www.caida.org/data>
- [10] Similar web web page, <https://www.similarweb.com>

学会発表リスト

- 正井楓人, 上山憲昭, ”少数キャッシュ構成の Anycast CDN の有効性評価” 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 沖縄, 2025 年 3 月
- 正井楓人, 上山憲昭, ”少数キャッシュ構成による Anycast CDN の遅延低減効果の評価” 電子情報通信学会 2025 年総合大会, 東京, 2025 年 3 月