

令和6年度 秋学期 卒業研究3 (BI)
学士論文

題目 低軌道衛星キャッシュの人気度を
考慮した最適コンテンツ配置法

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 2600210283-7
西嶋 昶

令和7年1月31日

概要

高度 2,000km 以下の低軌道を周回する衛星群を中継ノードとして用いる低軌道衛星ネットワークは、地上インフラが整備されていない地域も含め、世界各地にインターネットサービスを提供することが可能であり、産業界と学会の両方から注目を集めている。低軌道衛星ネットワークは軌道衛星と比べ高度が低いため、低電力で低遅延かつ大容量の通信が可能である。しかし、アップリンクのスループットが低いことが課題として挙げられ、地上局から衛星にデータを送信する場合にボトルネックとなり、遅延が増加する。この課題の解決策として、低軌道衛星上にキャッシュを設置する低軌道衛星キャッシュが検討されている。低軌道衛星は高速で地球上を周回し、世界の様々な地域から配信要求を受けることになる。そのため、世界的なコンテンツの人気度を考慮し、限られたキャッシュ容量を有効に使用するキャッシュ戦略が必要となる。そこで本稿では、低軌道衛星キャッシュにおいて、コンテンツの人気度を考慮した最適なコンテンツ配置法を提案する。

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	4
第2章 関連研究	6
2.1 衛星ネットワークキャッシュ	6
2.2 衛星間通信	6
第3章 提案方式	8
3.1 概要	8
3.2 配置方式	8
3.3 遺伝的アルゴリズム	9
3.3.1 遺伝的アルゴリズムの概要	9
3.3.2 適応度関数	12
第4章 性能評価	13
4.1 想定条件	13
4.2 実行結果	13
4.3 シミュレーション結果	16
第5章 まとめ	18
第6章 謝辞	19
学会発表リスト	21

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、スマートフォンやスマートフォンやタブレット PC などのモバイル通信機器の普及に伴い、いつでもどこでもネットワークにアクセスしたいというユーザーの要求はますます高まっている。しかし、現在のユーザがネットワークにアクセスするためのネットワークインフラは、地上端末が主流であり、砂漠、海、山岳地帯などの遠隔地や孤立した地域にネットワークインフラを展開することが困難、または展開コストが予想される収益を上回ることにより、地上インフラが整備されないという問題がある。そのため、世界人口のうち 30 億人以上がインターネットに接続しておらず、10 億人以上がインターネット接続ができない地域に住んでいる [1]。低軌道衛星ネットワークは、従来の地上ネットワークを補完し、デジタルデバイドの解消に役立つものとして注目されている。また、災害時に地上インフラが損壊した場合の代替策としても活用が期待されている。日本のような災害が頻発する国では、災害時の地上インフラ損壊により被災者のインターネット接続が制限される可能性が問題となっている。低軌道衛星は上空を周回しているため、地上で大規模な災害が発生しても運用が可能であり、被災者のインターネット接続制限を解消できる可能性がある。現在の低軌道衛星ネットワークの活用事例として、2024 年 1 月に起こった能登半島地震やウクライナでの利用例が挙げられる。現在の主要な低軌道衛星コンステレーションのひとつである Starlink は、能登半島地震の際に地上インフラの代替として活用された [2]。このように、低軌道衛星は非常時での活用や平常時の遠隔地に対してインターネット接続を提供する手段として注目されている。

低軌道衛星は、海拔 350km から 2000km の高度を周回する衛星群を中継ノードとして用いるネットワークである。中軌道や静止軌道に位置する衛星と比較して、低軌道衛星は地表面に近いので、アクセス遅延が短く、衛星への信号伝送のための電力が少なく、大容量の通信が可能である。また、衛星を軌道上に打ち上げるためのエネルギーが少なく、静止軌道衛星と比べ安価に打ち上げが可能である。しかし、低軌道衛星は高速で移動し、個々の衛星によるカバー範囲は比較的限られているため、目標とする地球全土へのサービス提供には大規模な衛星コンステレーションが必要である [3]。

現在の低軌道衛星ネットワークの課題として、アップリンクのスループットが低いことが挙げられる。図 1.1(a) に示すように、地上に存在するサーバから低軌道衛星経由を経由して大容量のコンテンツを地上の端末に配信する場合に、上りのスループットがボトルネックとなる。この課題の解決策として、低軌道衛星上にキャッシュを設置する低軌道衛星キャッシュが検討されている。図 1.1(b) に示すように、低軌道衛星上にキャッシュを設置し、キャッシュから直接コンテンツの配信を行うことでアップリンクが使用される頻度を減らし、コンテンツ配信にかかる遅延時間を削減することができる。

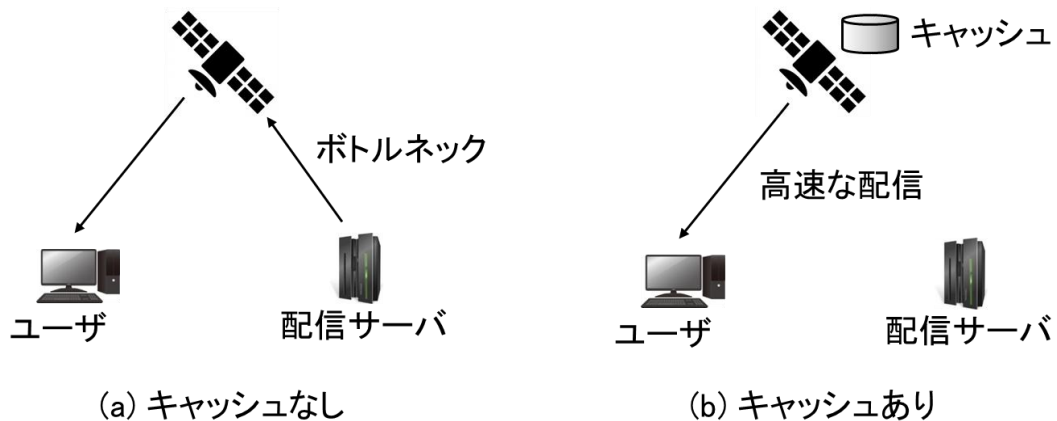


図 1.1: 低軌道衛星からのキャッシュ配信

1.2 研究の目的

低軌道衛星は高速で地球上空を周回しているため、世界の様々な地域から配信要求を受け取ることになる。そのため、低軌道衛星上のキャッシュに保存されるコンテンツについて、世界的に人気の高いコンテンツを多くキャッシュすることで、全体的なキャッシュヒット率を向上させられると考えられる。しかし、低軌道衛星上のキャッシュの容量は有限であるため、限られたキャッシュの容量を効率よく使用するキャッシュ戦略が必要となる。また、図 1.2 に示すような、低軌道衛星同士の間で光通信を行う衛星間通信技術を考慮すると、目的コンテンツが配信要求先の衛星にキャッシュされていない場合、衛星間通信を用いて配信を行う。この場合、衛星間通信が行われる回数は配信にかかる遅延時間に影響すると考えられる。よって、配信にかかるホップ数を削減するために、同一のコンテンツは複数の低軌道衛星キャッシュ上に分散して配置されることが望ましい。

そこで本稿では、コンテンツの世界的な人気度を考慮して、人気コンテンツの配置数を調整して平均的なキャッシュヒット率を向上させることに加え、配信にかかるホップ数を削減することを目指し、同一コンテンツを分散させた配置方法を提案する。また、提案する配置方式において、低軌道衛星キャッシュの容量を考慮したコンテンツ配置の最適化手法を提案する。

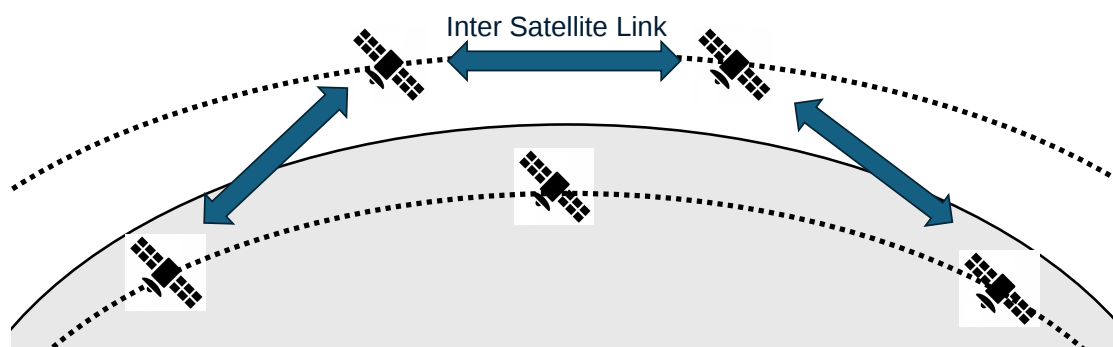


図 1.2: 低軌道衛星間の通信

第2章 関連研究

2.1 衛星ネットワークキャッシング

A. Armon らによる研究では、プロキシサービスに基づく初期のキャッシング衛星配信サービス (CSDS) を提案し、システムの分析と効率的な運用のためのフレームワークを提供する.[4]. この研究では、配信はキャッシングを持つ地上局を介して行うとしてモデル化し、衛星は地上局キャッシングへのブロードキャストに利用する. 近年の研究では、衛星ネットワークにおけるコンテンツの配置は、主に衛星上にオンボードキャッシングを持つと考えられている. Shuaijun Liu らの研究では、低軌道衛星ネットワークにおけるコンテンツ配置問題を多対多のマッチングゲーム理論を用いて定式化し、最適化のための新たなキャッシングアルゴリズムを提案する [5]. 提案されたアルゴリズムにより、コンテンツの平均アクセス遅延時間を削減する. Hao Wu らによる研究では、衛星を地上ネットワークに統合し、効率的にコンテンツ配信を行う方法として、地上局キャッシングと衛星キャッシングを持つ2層キャッシングモデルを提案する [6]. 提案モデルにおいて、共同キャッシング最適化問題を非線形整数計画問題として定式化し、効率的な問題解決のために遺伝的アルゴリズムに基づくキャッシング戦略を提案する. 提案方式によりキャッシングされるコンテンツを最適化し、トラフィック量を低減する. Jiaran Zhang らによる研究では、限られたキャッシングリソースでのコンテンツ配信の効率を向上させるため、コンテンツ認識比例キャッシング方式である CA-prop を提案する [7]. CA-prop は、コンテンツの時間変動要求特性を捉えて利用し、特定の種類のコンテンツのキャッシング比率を決定するものである. さらに、衛星の移動性とデータ配信方向を予測することによる事前キャッシング戦略で CA-prop を強化する. 提案方式により、データ配信遅延を削減し、キャッシングヒット率が向上する.

2.2 衛星間通信

Aizaz U. Chaudhry らによる研究では、SpaceX 社の Starlink が想定しているレーザー衛星間リンク (LISL) について分析を行う [8]. この研究によると、LISL は光信号を光送信機から光受信機に送信するため、送信機と受信機の間には明確な見通し線が必要となる. また、今後の衛星コンステレーションによる次世代衛星ネットワークでは 2020 年代半ばから後半までに完全に運用開始する予定であり、衛星間に LISL を想定している. この研究ではコンステレーション内の衛星の位置と衛星間リンクの持続時間に基づいて LISL を分類しており、主に2つのタイプがある. 1つは同一軌道内の2つの衛星間で確立する LISL であり、もう1つは2つの異なる軌道内の衛星間で確立する LISL である. 同一軌道内の衛星は速度が等しく、LISL の確立と維持が比較的簡単であるため、永続的な接続が可能である. 2つの異なる軌道内の衛星間で確立する LISL では、隣接する軌道間での LISL は

わずかな衛星の相対速度の違いにより確立が難しく，一時的な接続となる場合がある．永続的な LISL を確立できる数は，LISL の確立可能距離が長くなるほど増加する．

第3章 提案方式

3.1 概要

本研究では、低軌道衛星キャッシュにおいて、コンテンツの人気度を考慮した最適なコンテンツ配置法を提案する。衛星間通信が可能であると想定し、要求先の衛星キャッシュに目的コンテンツが存在しない場合、衛星間通信を用いて目的コンテンツをキャッシュしている最も近い衛星からコンテンツを配信する。目的コンテンツをキャッシュしている衛星が、ユーザの要求を受け取った衛星の近くに存在する場合、コンテンツ配信時に経由する衛星の数が少なくなり、配信に必要なホップ数が削減される。そのため、同一コンテンツはできるだけ分散して配置されているほうが望ましい。人気度の高いコンテンツについて、世界的に人気のコンテンツは世界中で要求される頻度が高くなると考えられるため、高人気コンテンツをキャッシュしている衛星の数は通信遅延に影響する。そのため、世界的に高人気のコンテンツはできるだけ多くの衛星キャッシュに保存されていることが望まれる。

本研究では上記の2点を考慮した、2つの方針のもとで衛星キャッシュへのコンテンツ配置法を提案する。1つ目の方針は、同一コンテンツを固めずに分散して配置し、配信ホップ数の低減を目指すことである。2つ目の方針は、高人気のコンテンツを多数配置することで、衛星コンステレーション全体でのキャッシュヒット率を向上させることである。これらの方針から、各コンテンツを低軌道衛星キャッシュ上に等間隔で配置し、コンテンツごとの人気度に応じて配置する間隔を設定する配置方式を提案する。また、各コンテンツの配置間隔を平均キャッシュヒット率が最大化するよう最適化する。最適化手法として、生物の進化過程を模倣して近似解を探索するメタヒューリスティックアルゴリズムである、遺伝的アルゴリズムを用いる。

3.2 配置方式

このセクションでは提案する配置方式について説明する。先述の通り、各コンテンツを低軌道衛星キャッシュ上に等間隔で配置し、コンテンツごとにそれぞれ配置間隔を定義する。図3.1は配置方式のイメージ図である。青い円はあるコンテンツをキャッシュしている衛星で、黒い点線の円はあるコンテンツをキャッシュしていない衛星である。また、黒い実線は軌道を表している。提案する配置方式では、各コンテンツに対して経度方向の配置間隔 x_m と、緯度方向の配置間隔 y_m を定義する。経度方向の配置間隔 x_m を決定すると、軌道 x_m 本ごとに1個、コンテンツ m が配置される。図3.1では $x_m = 3$ であり、軌道3本ごとに1つコンテンツ m が配置されている。同様に、緯度方向の配置間隔 y_m を決定すると、同一軌道内の衛星 y_m 個ごとに1個、コンテンツ m が配置される。図3.1

では $y_m = 3$ であり，同一軌道内の衛星 3 個ごとに 1 つコンテンツ m が配置されている．低軌道衛星ネットワークが地球全土をカバー可能であり，発生する配信要求のすべてが必ず衛星に送られるものとする．この場合，要求したコンテンツをキャッシュしている衛星に要求が届く確率は，図 3.1 の赤い点線に囲まれた衛星のうち青い円で表される衛星が選ばれる確率として考えられる．よって，各コンテンツ m の配置間隔 x_m と y_m から各コンテンツ m の推定キャッシュ率が計算可能であり，推定キャッシュヒット率は $1/(x_m * y_m)$ で計算される．

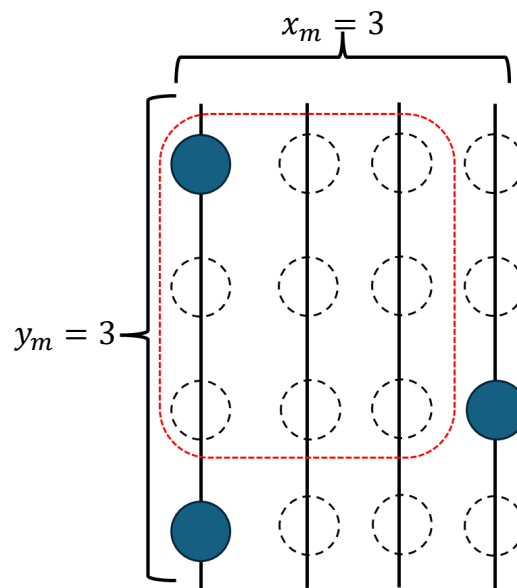


図 3.1: 配置方式のイメージ

3.3 遺伝的アルゴリズム

本研究では，各コンテンツの配置間隔を最適化するための手法として遺伝的アルゴリズムを用いている．遺伝的アルゴリズムとは，J. Holland が提案したダーウィンの進化論に基づく最適化アルゴリズムであり，さまざまな分野で広く使用されている [9][10]．GA (Genetic Algorithms) は複数の変数を同時に最適化することが可能であり，リソースの割り当てに使用されることが多く，汎用的な手法であることから，本研究における最適化アルゴリズムとして選択した．

3.3.1 遺伝的アルゴリズムの概要

GA は最適化問題の解集団に対して作用し，適者生存の原理によって探索を進行するアルゴリズムである．新たな解集団は現在の解集団内の個体に遺伝的演算子を反復的に適用することで生成される．解は適応度関数によって決められた適応度によって評価される．遺伝的演算子には，選択，交叉，突然変異，および置換が存在する．GA では各解が染色体として表され，最適な解に収束するためには複数回の反復を必要とする．

遺伝的演算子の 1 つである選択は、選択圧によって収束率に大きな影響を受ける GA では重要な操作である。選択操作によって交叉に参加する個体が選定される。現在、さまざまな選択手法が存在しており、ルーレット選択、トーナメント選択、ランダム選択などがある。自然界における淘汰のプロセスを正確に再現するためには、高い適応度を持つ個体が残る確率が高くなるべきである。しかし、適応度の低い個体が繁殖し、遺伝子組み換えによって価値がある遺伝的変異を起こす可能性があるため、GA に確率的要素を組み込むことは不可欠である。この変異はすぐに有益に働くわけではないが、長期的な進化の成功に貢献する可能性がある。ランダム性を組み込むことで、探索空間をより広く探索できるようになり、局所最適値への早期収束のリスクが軽減され、大域的最適値を特定する可能性が高まる。選択操作に基づき、交叉と突然変異という遺伝的演算子を利用する。交叉は、異なる個体からの解同士を結合することにより、適応度の高い解を得るために有利なパラメタの交換を促進する。突然変異は、GA における解の多様性を維持し、早期の収束を回避するために不可欠である。この操作によって、GA では初期の解集団内に存在しなかった解の探索を行うことができる。置換操作は GA の最終段階において、適応度による評価をもとに新たに生まれた子孫を解集団内に導入するかどうかを決定する。一般的な置換方式には、各世代で最も優れた個体が最も適応度が低い個体と置き換わるエリート主義と、集団全体を入れ替える世代置換がある [9]。

図 3.2 は GA のフローチャートである。アルゴリズムは初期集団の生成から始まり、最適化問題の目的関数を使用して初期集団の適応度が計算される。次にアルゴリズムの反復部分に入り、集団を進化させる。この反復処理内で選択、交叉、突然変異、および置換が実行される。反復回数が既定の世代数に達した時、アルゴリズムを終了する。各世代の個体数 N 、選択確率、交叉確率、処理を終了する世代数は初期パラメタとして任意の値を与える。

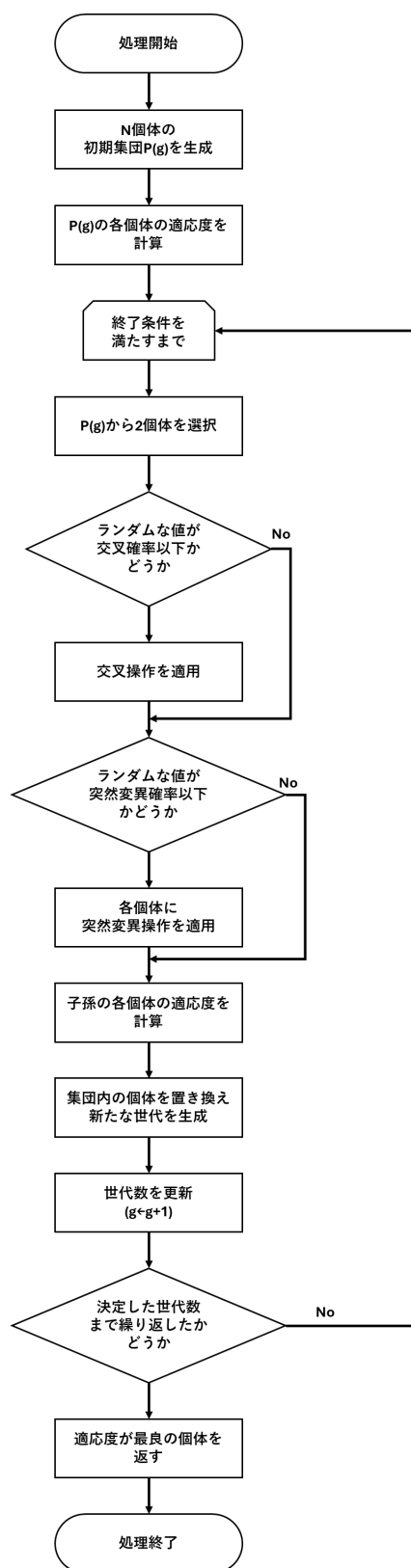


図 3.2: GA 処理チャート

本研究では、GA における選択手法として、ルーレット選択を利用した。ルーレット選択は、各個体の適応度の比率に基づいて選択が行われ、適応度が高い個体ほど選択されやすい手法である。選択確率 p は次式で表される。

$$p = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}$$

F は個体の適応度である。J. Holland が初めて GA を提案したときに採用された選択手法であり、実装が容易かつ初期集団において選択圧が強いため本研究ではルーレット選択を採用した。

3.3.2 適応度関数

本研究における GA では、先述した各コンテンツ m の配置間隔から計算される推定キャッシュヒット率に各コンテンツ m の要求比率 q_m を掛けた値の総和を適応度関数とした。すなわち、GA における適応度 F は、

$$F = \sum_{j=1}^M \frac{1}{x_m * y_m} * q_m$$

で計算される。各コンテンツが配信要求時に選択される確率 q_m は、次式のように Zipf 分布で与える。

$$q_m = \frac{\frac{1}{k^\theta}}{\sum_{j=1}^M \frac{1}{j^\theta}}$$

θ は Zipf 分布における偏りを示すパラメタである。

適応度関数 F を最大化するよう x_m , y_m の最適化を試みる。適応度関数の計算時に、衛星キャッシュにおける容量の制約条件について判定が行われる。GA において制約条件を扱うため、適応度関数にペナルティを与える方式を利用した。各コンテンツの配置間隔から配置されるコンテンツの総数を計算し、その総数が全衛星の総キャッシュ容量を超える場合に、ペナルティとして適応度が減少する処理を加える。適応度の減少度合い P は制約条件であるキャッシュ容量をどれだけ超えているかで決められ、次式のように計算される。

$$P = \frac{C_{used} - C_{max}}{C_{max}}$$

C_{used} は配置されたコンテンツの総数であり、 C_{max} は全衛星の総キャッシュ容量である。最終的な適応度は $F * P$ で計算される。この処理により、容量を大きく超える配置パターンを持つ個体は適応度が大きく減少し、次世代に残りづらくなる。

第4章 性能評価

4.1 想定条件

本研究では、極軌道コンステレーションを採用した衛星群を想定し、軌道数および同一軌道内の衛星数は極軌道コンステレーションを採用したサービスである、OneWebを参考として決定した。軌道数は12本、各軌道内の衛星数は49個である。すべての衛星がキャッシュを保持しており、各衛星キャッシュの容量はコンテンツ10個分とする。よって、キャッシュの総容量はコンテンツ5880個分となる。全部で1000個のコンテンツが存在し、各コンテンツ m が配信要求時に確率 q_m で選択されるとする。想定する低軌道衛星ネットワークは地球全土をカバー範囲とし、発生する配信要求は必ずいずれかの衛星に送られるものとする。

4.2 実行結果

本章ではGAの実行結果について記述する。図4.1は人気上位30位までのコンテンツに対して提案した配置方式のGAによる最適化を行った結果である。GAは1世代ごとの個体数10個体、交叉確率80%、突然変異確率0.1%で10万世代実行された。横軸に世代数を対数スケールで表示し、縦軸には各世代で最も高い適応度を表示している。最終世代で最も高い適応度を持つ個体の推定キャッシュヒット率は19.6%だった。

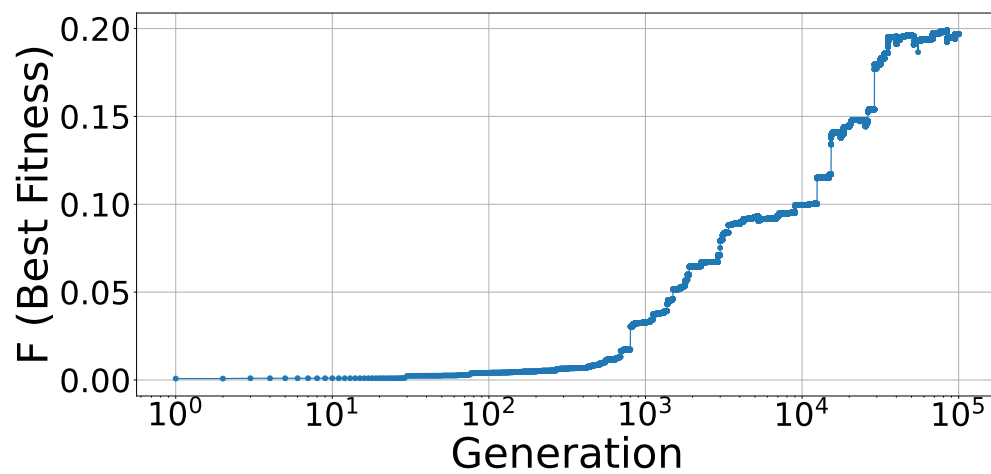


図 4.1: Result of GA(30)

下の表 4.1 は最終世代で最も高い適応度を持つ個体におけるコンテンツの配置間隔を示している。人気上位 4 番目までのコンテンツの配置間隔は、 $x_m = 1, y_m = 1$ となった。これは、遺伝的アルゴリズムにおける適応度計算処理で Zipf 分布の値を掛けているため、高人気コンテンツの推定キャッシュヒット率が低人気コンテンツの推定キャッシュヒット率と比べ高く評価されるためである。人気度 5 番目以降のコンテンツについては、Zipf 分布の値が人気上位 4 番目までのコンテンツと比べ小さく、適応度に対する影響が小さくなるため、キャッシュ容量の制約条件を満たすために配置間隔が広く設定されたと考えられる。

コンテンツの人気順位	x_m	y_m
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	2
5	1	1
6	2	1
7	4	12
8	1	1
9	4	1
10	3	1
11	1	4
12	4	3
13	6	2
14	8	1
15	1	1
16	7	10
17	2	7
18	3	42
19	4	40
20	3	46
21	11	31
22	5	33
23	6	17
24	6	42
25	10	45
26	7	6
27	2	32
28	9	5
29	5	37
30	5	44

表 4.1: コンテンツの配置間隔

図 4.2 は人気上位 100 位までのコンテンツに対して提案した配置方式の GA による最適化を行った結果である。最終世代で最も高い適応度を持つ個体の推定キャッシュヒット率は 19.0% だった。GA を適用するコンテンツ数が増加すると、変数が増えて複雑化することに加え、制約条件を満たす個体が生まれずらくなり、ペナルティによって適応度が下がり差が縮むために、性能が劣化したと考えられる。GA による配置間隔の最適化をすべてのコンテンツに適用することは、制約条件を満たす解空間を探索することが不可能になるため難しいと考えられる。

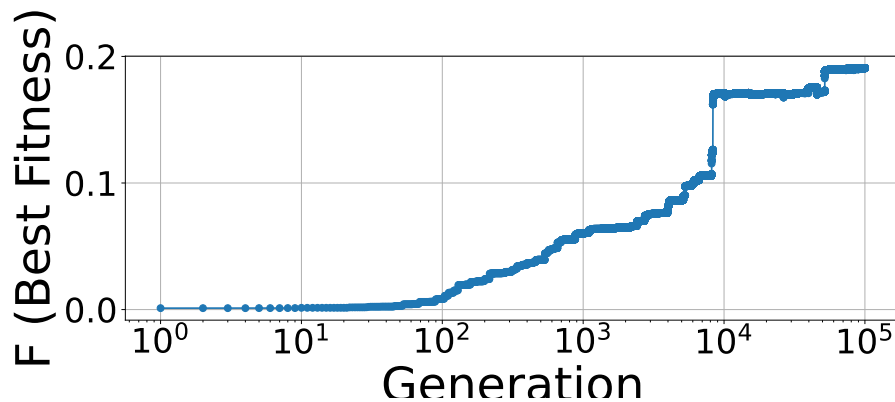


図 4.2: Result of GA(100)

4.3 シミュレーション結果

GA によって最適化したコンテンツ配置と、貪欲法を用いて最適化したコンテンツ配置および配置間隔をランダムに設定したコンテンツ配置を、簡易的なシミュレーションによって評価する。図 4.3 は Zipf 分布の偏りを変更したときの平均キャッシュヒット率の評価である。貪欲法での配置が最もキャッシュヒット率が高い。

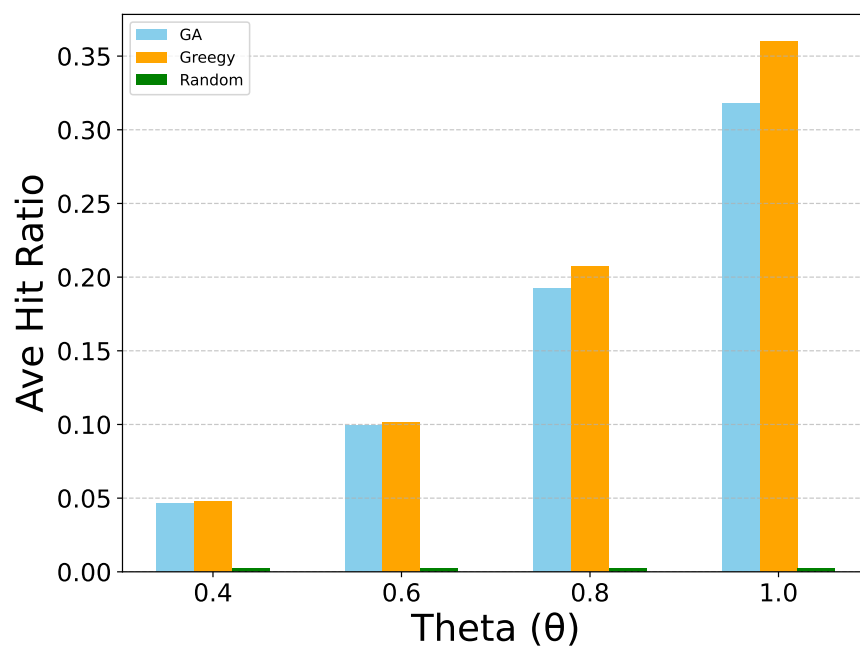


図 4.3: 平均キャッシュヒット率

図 4.4 は Zipf 分布の偏りを変更したときの平均ホップ数の評価である。GA による配置ではホップ数がわずかに少なくなる傾向がある。これは、GA による配置では貪欲法による配置と比べ、人気中位のコンテンツを多く配置するからであると考えられる。Zipf 分布

における偏りを緩やかにすると，GA による配置結果が貪欲法による配置結果に近づくため，平均キャッシュヒット率と平均ホップ数の差が小さくなる．

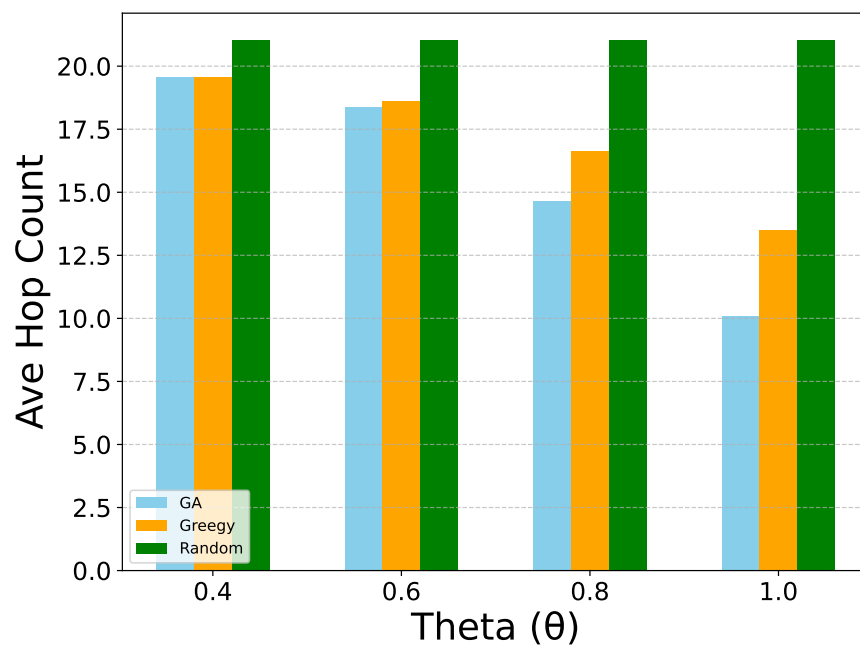


図 4.4: 平均ホップ数

第5章 まとめ

本稿では、アップリンクのスループットが低いことが課題として挙げられる低軌道衛星ネットワークにおいて、課題の解決策として検討されている低軌道衛星キャッシュのキャッシュ戦略を提案した。限られたキャッシュ容量を有効に使用するキャッシュ戦略として、世界的なコンテンツの人気度に基づき、キャッシュヒット率の最大化と配信ホップ数の低減を狙ったコンテンツの分散配置方法を提案し、コンテンツ配置を最適化するために GA を適用した。また、GA による配置結果と貪欲法による配置結果を比較した。

現状では簡易的なシミュレーションしかできていないため、今後は衛星の移動性やカバー可能範囲などを考慮したより厳密なシミュレータを利用し、キャッシュヒット率の評価と、配信にかかる平均ホップ数の評価を行う。また、ホップ数に関する評価を GA の適応度関数に組み込むことを考える。加えて、他のコンテンツ配置手法との比較を行う。

第6章 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] Ogutu B. Osoro, and Edward J. Oughton, "A Techno-Economic Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper", IEEE Access Volume: 9, pages: 141611 - 141625, 13 October 2021.
- [2] <https://www.starlink.com/jp>
- [3] Xingqin Lin, Stefano Cioni, Gilles Charbit, Nicolas Chuberre, Sven Hellsten, and Jean-Francois Boutillon, "On the Path to 6G: Embracing the Next Wave of Low Earth Orbit Satellite Access", IEEE Communications Magazine Volume: 59, pages: 36 - 42, December 2021.
- [4] A. Armon, and H. Levy, "Cache satellite distribution systems: modeling, analysis, and efficient operation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications Volume: 22, pages: 218 - 228, February 2004.
- [5] Shuaijun Liu, Xin Hu, Yipeng Wang, Gaofeng Cui, and Weidong Wang, "Distributed Caching Based on Matching Game in LEO Satellite Constellation Networks", IEEE Communications Letters Volume: 22, pages: 300 - 303, February 2018.
- [6] Hao Wu, Jian Li, Hancheng Lu, and Peilin Hong, "A Two-Layer Caching Model for Content Delivery Services in Satellite-Terrestrial Networks", 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 04 - 08 December 2016.
- [7] Jiaran Zhang, Yating Yang, Huanyu Sang, Zhuoqun Gao, and Tian Song, "Content-Aware Proportional Caching for Efficient Data Delivery over Satellite Network", GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference, 04 - 08 December 2023.
- [8] Aizaz U. Chaudhry, and Halim Yanikomeroglu, "Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis", IEEE Vehicular Technology Magazine Volume: 16, pages: 48 - 56, June 2021.
- [9] F. Naranjo E Edison, E Marcela Mosquera, T Berenice Arguero, and A Julio Zambrano, "Experimental Study of Convergence and Stability of a Genetic Algorithm Using Different Selection Methods", 2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 15-18 October 2024.
- [10] J. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", 1975.

学会発表リスト

- 西嶋舶, 上山憲昭, ”低軌道衛星キャッシュの人気度を考慮した最適コンテンツ配置法”, 電子情報通信学会 2025 年総合大会, B-6, 東京, 2025 年 1 月
- 西嶋舶, 上山憲昭, ”低軌道衛星キャッシュの人気度に基づく最適コンテンツ配置法”, 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