

令和6年度 秋学期 卒業研究3 (BI)
学士論文

題目 LEO衛星ネットワークにおける
需要の空間的局所性を活かすキ
ャッシュ制御法

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 26002100788

岡崎直人

令和7年1月31日

概要

地上インフラを展開できない地域へネットワークを接続する方法としてLEO(Low Earth Orbit)衛星の活用が有効である。LEO衛星はカバー範囲が広い上、低電力・低遅延・大容量の通信が可能である。しかし、LEO衛星にはアップリンクのスループットが低いという欠点がある。これは地上に存在するサーバからLEO衛星経由で大容量のコンテンツを配信する際にボトルネックとなる。そのためLEO衛星にキャッシュを設置し、LEO衛星からのキャッシュ配信が有効である。しかし、従来の地上キャッシュではキャッシュは不動で、コンテンツ人気度の空間的な局所性を活かすことでキャッシュヒット率向上が可能であるが、LEO衛星は高速で移動するため、コンテンツ人気度の空間的な局所性を活用できない。そこで本稿では衛星をグルーピングすることでコンテンツ人気度の空間的な局所性に対応できるキャッシュ制御方式を提案する。そして計算機シミュレーションを行い、提案方式を用いることでキャッシュヒット率が向上することを示す。

目次

概要	1
第1章 序論	3
1.1 研究の背景	3
1.1.1 LEO衛星ネットワーク	3
1.1.2 Information-Centric Networking	4
1.1.3 LEO衛星ネットワークとICNの親和性	4
1.2 研究の目的	5
第2章 関連研究	7
2.1 固定カバレッジ	7
2.2 衛星間通信	7
2.3 要求コンテンツの偏り	7
第3章 提案方式	9
3.1 概要と特徴	9
3.2 提案方式の動作	10
第4章 性能解析	12
4.1 評価条件	12
4.1.1 想定環境	12
4.1.2 Starperf	13
4.1.3 衛星間通信	13
4.1.4 要求発生モデル	14
4.2 キャッシュヒット率	16
4.3 遅延減少量	17
第5章 まとめ	19
謝辞	20

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 LEO 衛星ネットワーク

近年、インターネットにアクセスできるようになった人が増大し、ネットワークトラフィック需要が増加している。一方で、過疎地や陸・海といった地域では地上インフラを展開できない、または展開コストが収益を上回ることにより、地上インフラを展開しないといった現状がある。そのため、インターネットにアクセスしたい人たちに対してブロードバンドを提供することができていない。そこで、従来の地上ネットワークを補完・代替するものとしてLEO衛星ネットワークが注目を集めている [1]。LEO衛星ネットワークは高度2,000km以下の低軌道を周回する衛星を中継ノードとして用いたネットワークである。高度36,000km付近を維持する静止軌道衛星と比べて高度がかなり低いため、低電力・低遅延・大容量の通信が可能である。また、一つの衛星でカバーできる通信可能範囲が地上ネットワークに比べて大きく、シームレスなカバレッジを提供することが可能である。日本のように災害が多い国では災害が起こるたびに地上インフラが損壊し、インターネットアクセスが制限される可能性がある。一方、LEO衛星は空中を周回することから地上の災害状況に関係なく、運用することが可能である [2]。現在の低軌道衛星ネットワークの活用事例としては2024年1月に起こった能登半島地震やウクライナでの活用である。能登半島地震の際には地上インフラの代替としてSpaceX社が運用する低軌道衛星ネットワーク「Starlink[3]」が活用された。このように地上インフラが機能していない場合でも運用できることから平時での活用も望まれている。そのため、今度はコンテンツ配信にも活用される。しかしLEO衛星はアップリンクのスループットが低いという課題がある。図1.1(a)に示すように地上に存在するサーバから大容量のコンテンツを地上の端末に配信する際に、アップリンクのスループットがボトルネックとなり、ユーザが要求したコンテンツを配信できない・遅延が大きくなるという問題が起こる。そこで、図1.1(b)に示すように、LEO衛星にキャッシュを設置し、LEO衛星からのキャッシュ配信が有効であると考えた。キャッシングとは、ユーザの効率的なコンテンツ取得を可能にする技術である [4]。図1.3に示すように従来の地上キャッシュはコンテンツ人気度の空間的な局所性を活用してキャッシュ性能を向上させていた。空間的局所性はキャッシュの性能に大きな影響を与える [5]。しかし、LEO衛星には常に移動する特性があり、同じ位置に留まっていない。そのため、担当エリアが変わるとキャッシュしているコンテンツが全く呼ばれない可能性がある。

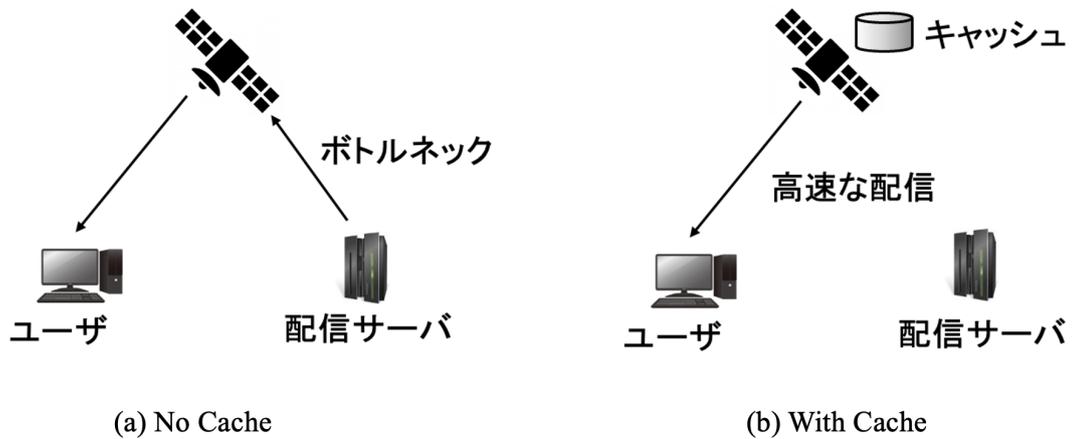


図 1.1: LEO 衛星からのキャッシュ配信

1.1.2 Information-Centric Networking

近年のネットワークにおいてコンテンツ配信が大きなトラフィック量を占めていることからコンテンツ自体に名前をつける情報指向ネットワーク (ICN:Information-Centric Networking)[6] が注目を集めている。コンテンツ名でのデータ通信が可能であるため、各デバイスでデータをキャッシュすることが可能である。よって、配信サーバからの配信経路上に、ユーザの要求コンテンツをキャッシュしているデバイスがあった際にそのデバイスからコンテンツを返送することが可能である。

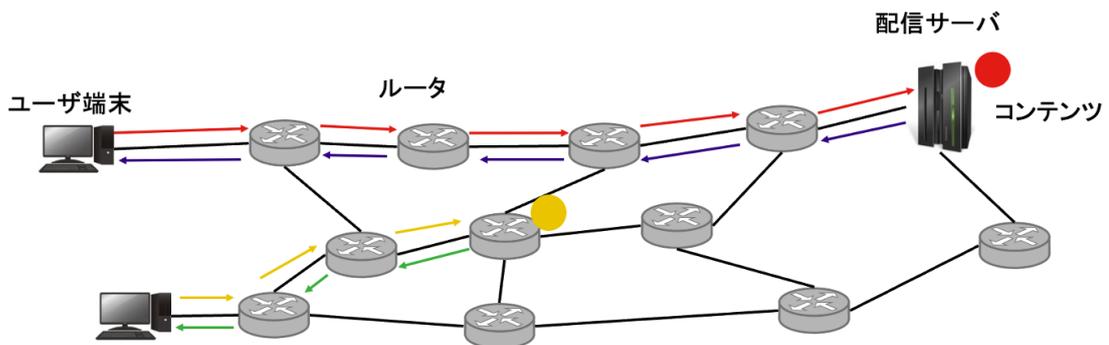


図 1.2: Information-Centric Networking

1.1.3 LEO 衛星ネットワークと ICN の親和性

LEO 衛星は資源が乏しく、一つの衛星に大規模なキャッシュを設置することができない。また、衛星間の接続関係は動的に変化することからより近い距離でデータを配信する方がよい。そのため、LEO は各デバイスがコンテンツをキャッシュする ICN との親和性が高い。

1.2 研究の目的

図 1.3 に示すように従来の地上キャッシュでは配信サーバは自身が位置する地域において人気のコンテンツをキャッシュする。つまり、地上キャッシュでは空間的局所性を活かしてキャッシュ性能を高めていた。しかし、LEO 衛星は常に移動する特性を有している。図 1.4 に示すように、LEO 衛星の移動に伴って配信するエリアが変化すると、要求されるコンテンツが全く異なる場合がある。その場合、キャッシュしたコンテンツは再度要求されることが少なくなり、キャッシュ性能を向上させることができない。

そこで、本稿では、地上と衛星をグループ分けし、キャッシュするコンテンツのバリエーションを高めることでコンテンツ配信における遅延の減少を可能とする方式を提案する。従来の地上キャッシュの方式をそのまま適用した場合、全ての衛星が似たコンテンツをキャッシュするため、キャッシュミス時に他の衛星でもキャッシュミスする可能性が高い。その結果、オリジンサーバからコンテンツを取得する形となり、遅延が増大する。一方で、各衛星が主にキャッシュするコンテンツをグループごとに分けることで、キャッシュコンテンツのバリエーションが高まる。その結果、オリジンサーバからコンテンツを取得するまでの経路途中の衛星でキャッシュヒットする可能性が高くなり、遅延が減少する。有効性を示すために従来の地上インフラにおけるキャッシュ方式と提案方式とで、遅延の減少量、キャッシュヒット率を各々、簡易な解析モデルで導出し、定量的に比較する。

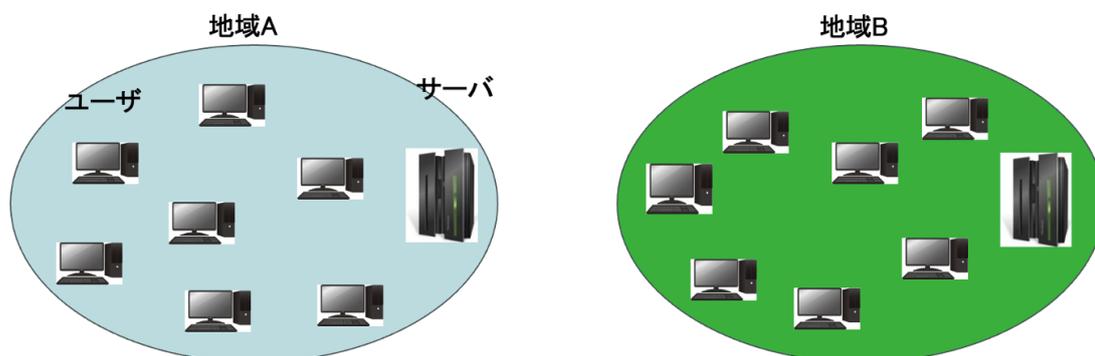


図 1.3: 地上キャッシュ

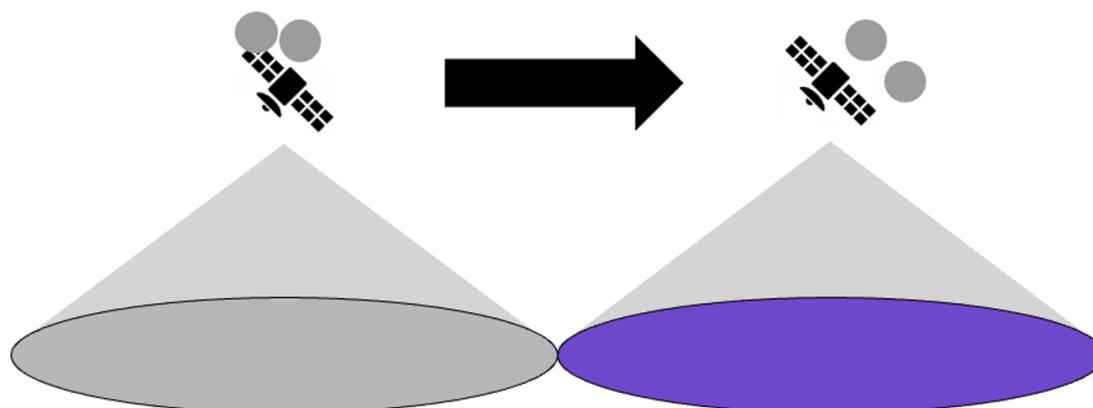


図 1.4: LEO 衛星の移動する特性

第2章 関連研究

2.1 固定カバレッジ

H. Wu らによる研究では衛星と地上ネットワークを統合した環境での効率的なコンテンツ配信のための二層キャッシュモデルが提案された [7]. この研究では, 衛星が地上ネットワークの補完的な役割を果たすことを前提として, キャッシュコンテンツの管理の最適化をすることで, トラフィック量の低減を実現した. J. Li らによる研究では, 統合型衛星/地上無線アクセスネットワークにおけるエネルギー効率とトラフィックオフロードの最適化について議論されている [8]. これらの研究では重み静止軌道衛星や中高度衛星 (MEO) といった静的な衛星を前提としてモデル化しており, LEO 衛星に移動する特性を考慮した設計になっていない. そのため, LEO 衛星に動的なトポロジ変化を反映したキャッシュ管理手法には適用が難しい.

2.2 衛星間通信

A. U. Chaudhry らによる研究では LEO 衛星コンステレーションにおけるレーザー ISL について, 分析が行われた [9]. この研究は, 特に Starlink を対象として行われており, 衛星間通信における接続方式やその性能に焦点が当てられている. 衛星間通信の接続方式は二つに分けることができる. 一つ目は, 静的接続方式だ. 静的接続方式では接続相手が固定されており, トポロジが一定保たれるため, トポロジ管理が容易である一方, LEO 衛星の高速な移動や頻繁なトポロジ変化には適応しにくいという課題がある. 二つ目は, 動的接続方式だ. 動的接続方式では, 衛星の移動に応じて接続衛星が動的に変更される. そのため, LEO 衛星の移動する特性を活用できるものの, 頻繁な接続変更による制御の複雑化が問題となる. また, 衛星間通信で接続する衛星の距離をパラメータとして変更することで, 各衛星が接続する台数を変化されてシミュレーションを行われていたが, 衛星間の距離が長くなるほど接続が不安定になる.

2.3 要求コンテンツの偏り

H. Lee らの研究では LEO 衛星通信システムにおけるキャッシュ効率を向上させるために衛星が次に移動する地域との要求コンテンツの相関を考慮してキャッシュするコンテンツを選択する方式を提案している [10]. コンテンツ人気度とユーザの要求頻度を考慮してキャッシュ管理を行い, システム全体の通信遅延とキャッシュヒット率を最適化することを目的としている.

Z. Zheng らの研究では情報指向ネットワークを構造を利用し, LEO 衛星ネットワークにおけるキャッシュ置換を最適化する手法を提案している [11]. 通信遅延を最小化することを目的としており, CRCI という独自の手法を用いてキャッシュコンテンツを置換するかを選択する方式が設計されている. CRCI はあるコンテンツをキャッシュすることでどれくらいの通信遅延を減少させられるかを指標とするもので, 要求回数とコンテンツ人気度から算出される. T. Zhang らの研究でも情報指向ネットワークの構造を利用し, LEO 衛星ネットワークにおけるキャッシュ置換を最適化する手法を提案している [12]. 彼らの研究では先行衛星が後続衛星にキャッシュコンテンツを転送することで特定の地点のみを見たときに常に同じようなキャッシュサーバがあるように見せる方式を提案している.

しかし, これらの研究では要求発生モデルが空間的局所性を考慮していない. これらの研究では全地域におけるコンテンツ要求が同一の Zipf 分布に従うと仮定されている. つまり, どの地域においても要求されるコンテンツの偏りが同じ, または偏りが似ており, 現実世界には則していない. 日本やアメリカなど異なる地理的地域間でのコンテンツ需要の大きな違いを考慮していない. このような要求発生モデルは現実世界を正しく反映しておらず, シミュレーションにおける性能評価の信頼を損なう恐れがある.

第3章 提案方式

3.1 概要と特徴

提案方式では衛星をグルーピングし、グループごとにキャッシュするコンテンツを分散させる。この方式により、任意の場所からの要求が発生した際、その要求に応じられる異なるグループの衛星が存在することで、コンテンツのバリエーションが高まり、キャッシュヒット率が向上する。その結果、オリジンサーバへアクセスする回数が減少する。図 3.1 では衛星をグルーピングしなかった場合 (a) とグルーピングした場合 (b) のコンテンツのバリエーションを例示している。グルーピングしていない場合、全ての衛星が似たコンテンツをキャッシュすることになり、局所性に対応できない。一方で、グルーピングをした場合は、グループごとにエリアを割り当て各エリアの高需要コンテンツを主にキャッシュするため、局所性に対応しやすくなる。提案方式ではユーザがコンテンツを要求した際には通信可能範囲内で同じグループの衛星が優先してユーザと通信するようにする。ユーザと通信する衛星がコンテンツを持っていない場合、衛星間通信を利用してオリジンサーバからコンテンツを取得する。また、経路の途中で同じグループの衛星があった場合は、その衛星もコンテンツをキャッシュする。

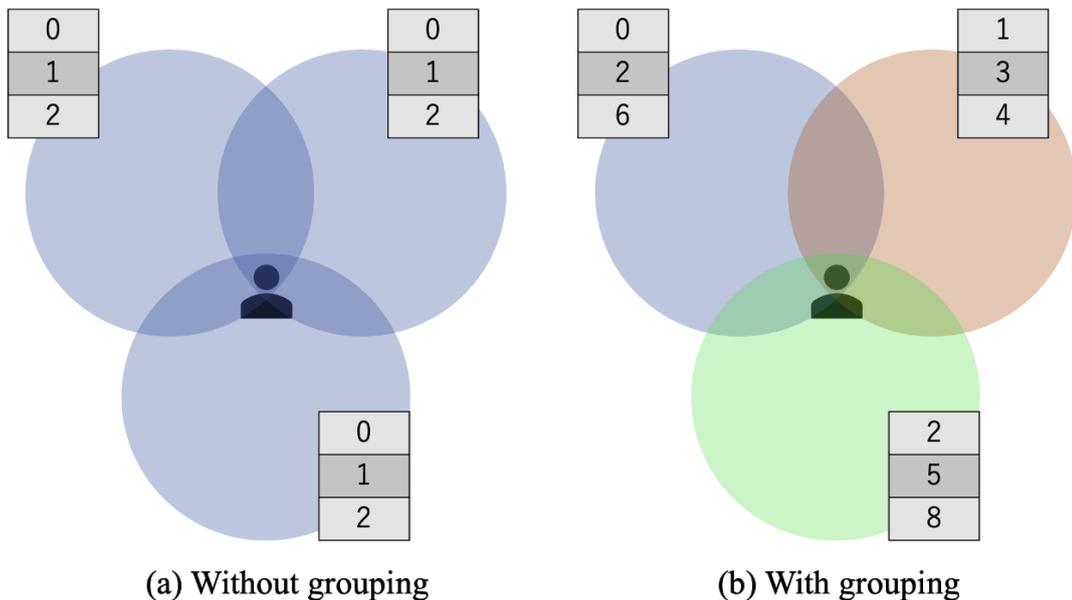


図 3.1: LEO 衛星からのキャッシュ配信

3.2 提案方式の動作

提案方式では、各衛星がキャッシュするコンテンツを分散させるために、衛星をグルーピングし、各衛星は割り当てエリアからの要求に対してのみキャッシュコンテンツを置換する。提案アルゴリズムを以下に示す。なお、グループ数を G とする。

1. 地表面を一様に六角形グリッドに分割し、それぞれをグループ分けする。
2. 同一軌道面上を周回する衛星に対し、順番に属するグループを $1, 2, \dots, G, 1, \dots$ のように割り当てる。
3. ユーザがコンテンツを要求した際に、通信可能範囲内でコンテンツを所持している衛星が優先的にユーザと通信する
4. 直接通信する衛星がユーザの要求するコンテンツを持っていなかった場合、衛星間通信を利用してオリジンサーバからコンテンツを取得する。なお、経路の途中で同じグループの衛星があった場合は、その衛星もコンテンツをキャッシュする。

図 3.2 に単一衛星の時間経過に伴う位置プロットを示す。衛星は自転の影響により同じ位置を周回するわけではない。そのため、特定の地域に重点をおいたグルーピング方式よりも一様にグルーピングをした方が幅広く局所性に適応できる。

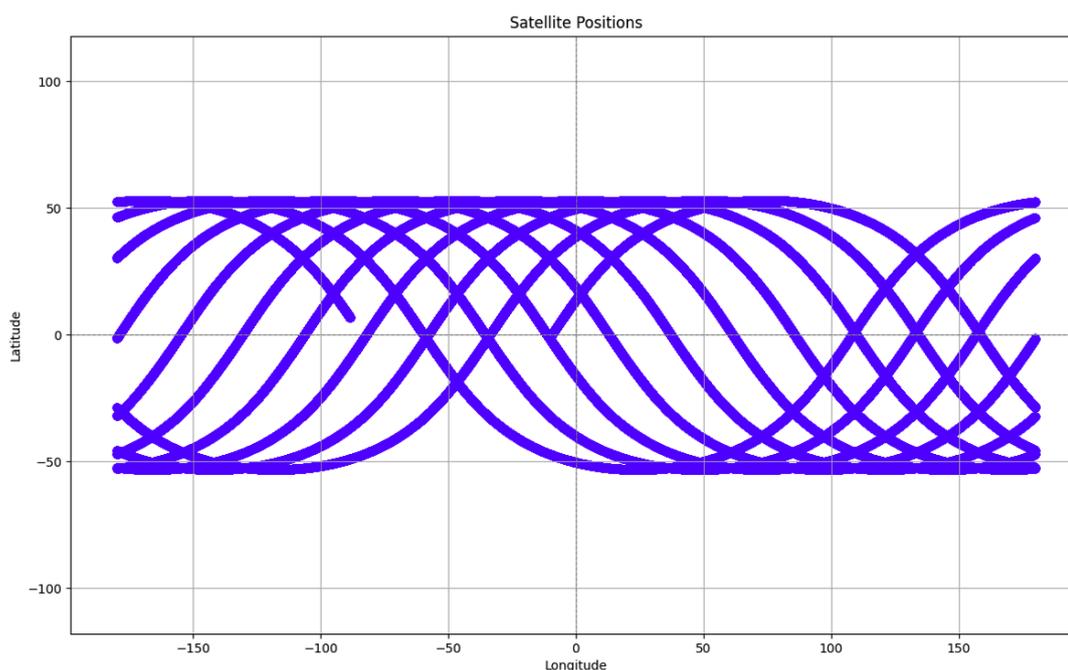


図 3.2: 衛星の移動経路

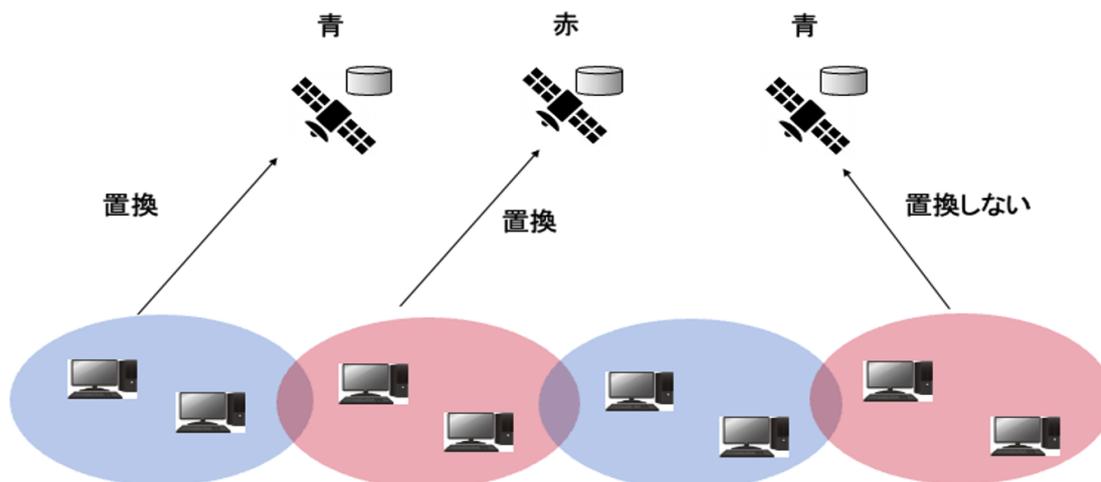


図 3.3: コンテンツの置換

図 3.3 に衛星がキャッシュコンテンツを置換する際の手順を示す。各衛星は、自身と同じグループに属するユーザからの要求をキャッシュする。具体的には、青のグループの衛星は青の地域のユーザから要求されたコンテンツが自身を経由する際にキャッシュする。一方、異なるグループのユーザからの要求に対しては中継衛星としてのみ役割を果たし、キャッシュコンテンツは置換しない。ただし、非割り当てエリアに関しても要求されたコンテンツを保持している場合は、配信を行う。

第4章 性能解析

4.1 評価条件

4.1.1 想定環境

提案方式の有効性を検証するために、計算機シミュレーションを用いた性能評価を行う。特に、提案方式とグルーピングしない場合の、キャッシュヒット率、遅延削減量を各々、解析により導出する。

総コンテンツ数 \times 衛星数 \times キャッシュ容量という制約の下、総コンテンツ数を 50,000 とし各衛星のキャッシュ容量は 10 と設定する。ユーザが要求するコンテンツはユーザが属するグリッドが属する国の言語のコンテンツである。言語別にコンテンツの集合を用意し、言語別に要求頻度を zipf 分布で設定する。各グリッドの国は NOMINATIM API[16] を用いて取得した。また、各グリッドの人口密度は GPW のデータセットを用いた [17]。また、国に対応する言語は Kaggle のデータセットを用いた [18]。

各グリッドの一秒あたりの要求数は自身のエリアの人口密度が全世界の人口密度の総和に占める割合から算出した。これは、[20] より主要なネットワークサービスの月間 Web ページ訪問数から一秒あたりの訪問数を計算した。また、現時点ですべてのネットワークトラフィックが LEO 衛星に集中することは考えづらく、LEO 衛星自体にはまだその性能はない。よって、全世界の 100 分の 1 の人口が LEO 衛星ネットワークを通して通信を行うものとし、一秒あたりの要求数が合計で全世界の要求数が 1,500 回になるように設定した。

地表面を分割する際には六角形グリッドを採用した。六角形は円形の最も近い形状でありながら平面を完全に埋めることができるため、地表を均等に分割するのに適している [13]。これは、LEO 衛星の通信可能範囲は円形であることと一致している。オリジンサーバは人口都市ランキングトップ 1,000 の都市 [19] に配置し、サーバが属する国の言語のオリジナルコンテンツを保持する。オリジナルコンテンツはいずれかのオリジンサーバが一つだけ保持するものとする。

ユーザが要求したコンテンツはキャッシュミスした場合に、衛星間通信を通して転送される。その際の経路選択方法は遅延を重みとしたダイクストラ法である。現実世界では接続する衛星との位置関係からリンクが切れやすくなる場合があるが、本シミュレーションでは衛星間通信のリンク接続切れは起こらないものとする。各オリジンサーバが保持するオリジナルコンテンツ量は、同じ言語の都市の人口の総和から自身の都市の人口割合を出すことで算出する。

コンテンツ取得の際に、大きな遅延があれば衛星が通信可能範囲外に移動してしまうため、ユーザにコンテンツを配信できない可能性がある。その場合、ハンドオーバーによってユーザにコンテンツを配信する処理が必要となるが、本シミュレーションでは要求された

コンテンツは一つの衛星で応答できるものとし、ハンドオーバーはおこらないものとする。また、各衛星の置換方式は LRU とする。

衛星の位置が変化してもユーザ要求の空間的局所性に対応できることを示すために、シミュレーション時間は軌道周期 10 周分に相当する 60,000 秒とする。シミュレーションの開始はすべての衛星のキャッシュが埋まってからとする。

4.1.2 Starperf

シミュレーションにあたり、衛星の軌道シミュレータである Starperf[14] を使用した。Starperf は Starlink や OneWeb, Kuiper などの低軌道衛星のシミュレーションを行うプラットフォームとして提供されている。シミュレーションでは現状すでに運用されており、実用性の高い Starlink を採用した。Starlink は目的に応じて高度・軌道傾斜角の異なるシェールと呼ばれる層を作っている (表 4.1)。Starlink は主に中緯度地域をターゲットとしてネットワークを提供することを目的としており、中緯度地域に多数の衛星を配置している。

	高度(km)	軌道周期	軌道傾斜角	軌道数	軌道内衛星数	合計衛星数
一層	550	5731	53.0	72	22	1584
二層	570	5755	70	36	20	720
三層	560	5743	97.6	10	52	520
四層	540	5718	53.2	72	22	1584

表 4.1: 衛星モデル

4.1.3 衛星間通信

衛星ネットワークにおいて、衛星間通信 (Inter-Satellite-Links) はトポロジを形成する上で、重要な役割を担っている。地上インフラの場合、周囲の建物の状況などから目的のドメインまで直線で到達することはできない。しかし、LEO 衛星は空中にあるため、直線上で通信ができるため、地上インフラと比べて高速である。また、空中にいることから障害物の影響を受けず、高いデータレートを出すことができる。

ユーザからのコンテンツ要求に対して Direct Satellite がキャッシュミスした場合にはオリジンサーバからコンテンツを取得する。その際に Direct Satellite からオリジンサーバまでの経路は衛星間通信を通じて確立するが、衛星の移動する特性上、動的にトポロジが変化する。衛星同士を接続する方式は様々あるが、相対位置が変わりづらい上下左右の衛星と接続する + Grid 方式 [15] を採用している。この手法では各衛星は同じ軌道傾斜角の衛星と接続され、メッシュのような構造になる。同じ軌道傾斜角を持つため、衛星が移動する前と後での相対位置が変わらず、安定した通信が見込まれる。

4.1.4 要求発生モデル

LEO 衛星ネットワークの研究においてユーザの要求パターンは結果に大きな影響を与える。既存研究では各地域のコンテンツ人気度に相関があり、現実世界のユーザ要求を正しく反映できていない。そこで、本稿では新しく全世界の要求発生モデルを作成した。

1. 地表面を緯度経度一度ずつのグリッドに分割する。
2. 総コンテンツ数を設定し、その中で人口割合に応じて言語別にコンテンツの集合を用意する (図 4.1)。
3. 言語別に zipf 分布に従う要求頻度を設定する。
4. ユーザは自身が属するグリッドが属する国の言語に該当するコンテンツ集合からコンテンツを要求する。

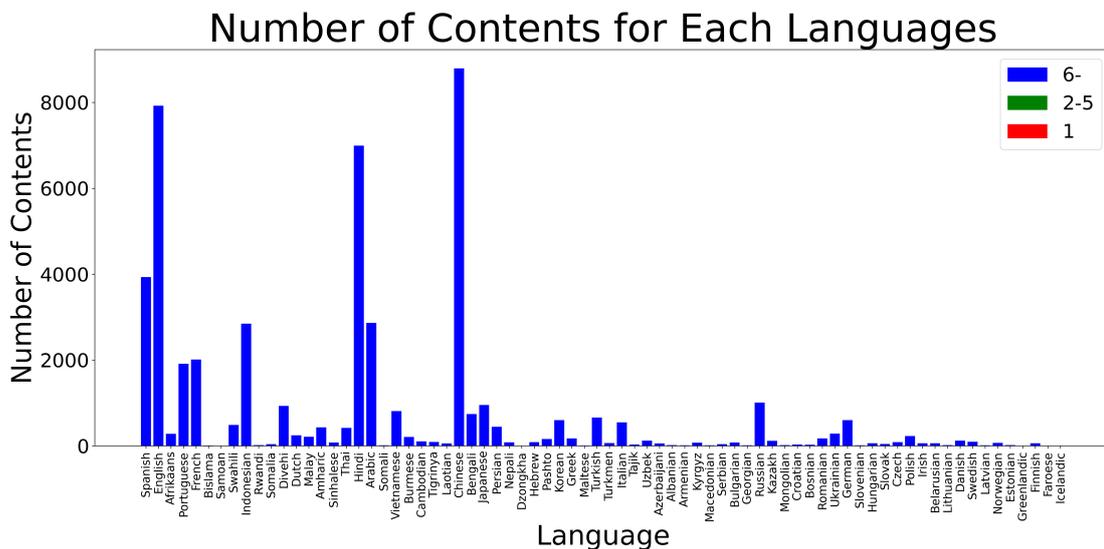


図 4.1: 各言語のコンテンツ割り当て数

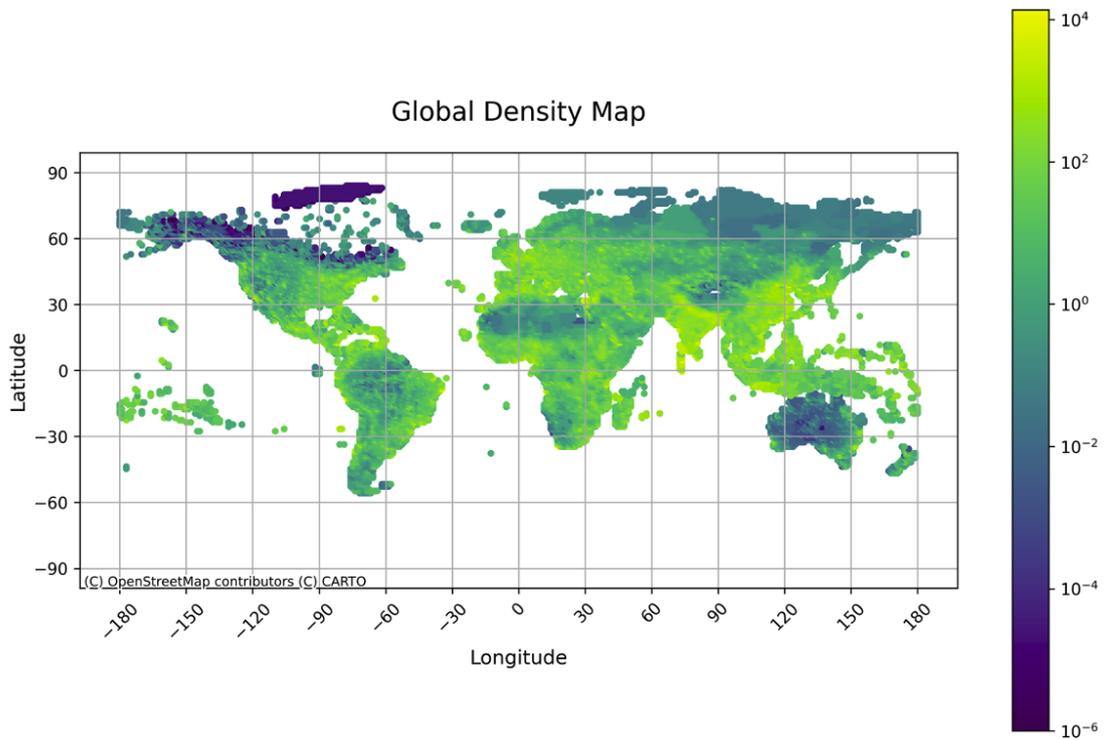


図 4.2: 世界の人口密度

また、ネットワークトラフィックは全世界で均一ではない。そのため、図 4.2 に示す人口密度に従って各グリッドの要求数を決定する。

$$Demand_{world} = \sum demand_{i,j} * \frac{density_{i,j}}{total\ density} \tag{4.1}$$

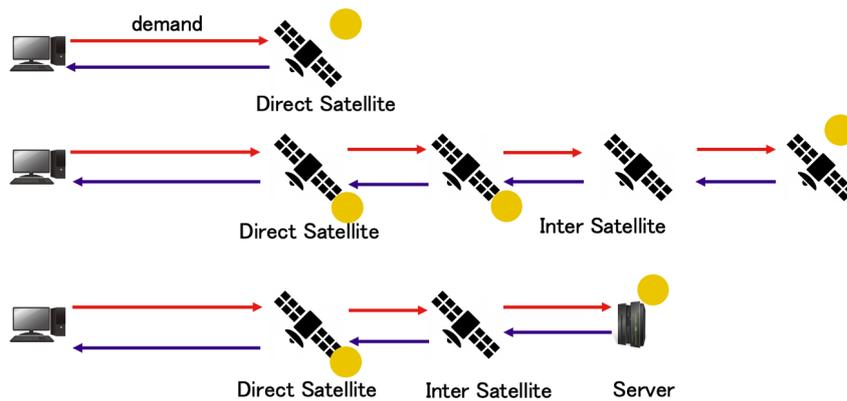


図 4.3: コンテンツ要求から配信までの流れ

ユーザがコンテンツ要求を発行した際には、図 4.3 に示す 3 パターンでコンテンツを返送する。このうちの 1,2 はオリジンサーバまでのコンテンツ取得経路上にコンテンツをキャッ

シュしている衛星があることを意味し、コンテンツ取得の際に生じる遅延を減少させることができる。

1. ユーザと直接通信する衛星 (Direct Satellite) がユーザの要求するコンテンツをキャッシュしており、そのまま返送できる場合
2. Direct Satellite でキャッシュミスした場合にオリジンサーバまでの経路途中の衛星 (Inter Satellite) でキャッシュヒットしその衛星から返送できる場合
3. Direct Satellite でも Inter Satellite でもキャッシュヒットせずにオリジンサーバからコンテンツを取得して返送する場合

4.2 キャッシュヒット率

キャッシュヒット率は、ユーザが発行したコンテンツ要求のうち、対応するコンテンツが Direct Satellite または Inter Satellite から返送された割合である。図 4.4 にグループ数=5 で zipf の値の変化に伴うキャッシュヒット率の変化を示す。各パラメータにおいて左側が提案方式、右側がグルーピングしない場合のキャッシュヒット率である。棒グラフにおいて下の値が Direct Satellite でキャッシュヒットした割合であり、上の値が Inter Satellite でキャッシュヒットした場合の割合である。Direct Satellite はコンテンツをキャッシュしている衛星を優先的に選んでいるため、キャッシュヒット率が高くなっている。提案方式ではコンテンツのバリエーションを高めることができているため、キャッシュヒット率が向上している。また、Inter Satellite でのキャッシュヒットする割合もグルーピングしない場合と比較して高くなっている。

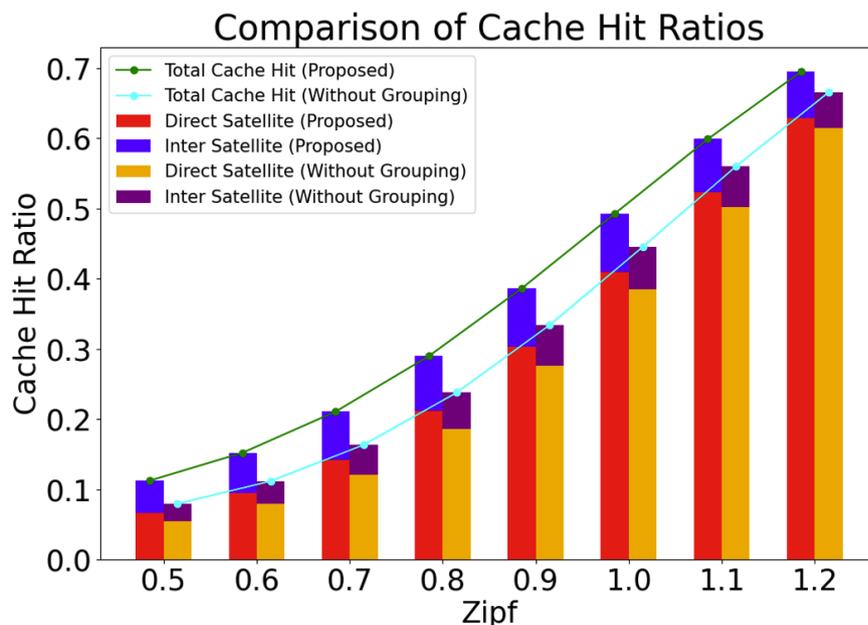


図 4.4: Zipf の値に伴うキャッシュヒット率の変化

図 4.5 に zipf=0.8 でグループ数を変化させた場合のキャッシュヒット率の変化を示す。少しであるが、グループ数によってキャッシュヒット率が変化している。特に、グループ数が 3 の時が一番キャッシュヒット率が高く、理由としてユーザと通信可能範囲内にいる衛星が 3~5 台であるためである。

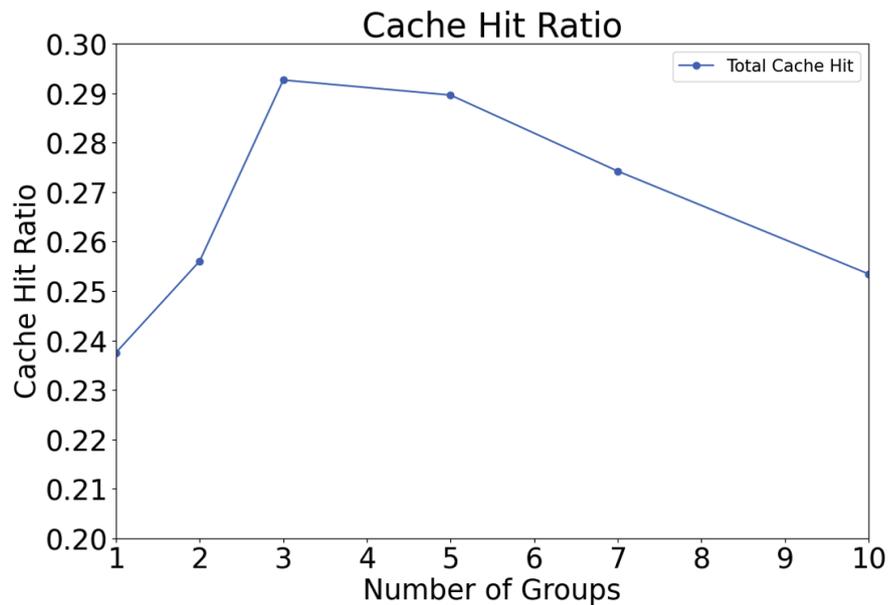


図 4.5: グループ数の変化に伴うキャッシュヒット率の変化

4.3 遅延減少量

遅延減少量はオリジンサーバから返送された場合の伝搬遅延から実際にかかった遅延を引くことで計算される。図 4.6 にグループ数=5 で zipf の値の変化に伴う遅延減少量の変化を示す。キャッシュヒット率の変化に伴って遅延減少量も増加していることがわかる。

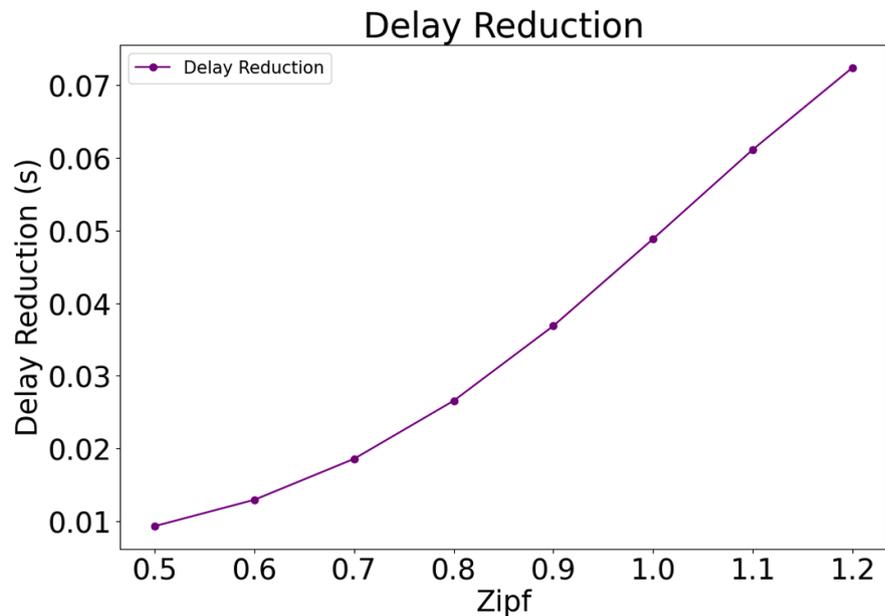


図 4.6: Zipf の値に伴う遅延削減量の変化

図 4.7 に zipf=0.8 でグループ数を変化させた場合の遅延減少量の変化を示す。グループ数は 5 が最大の遅延減少量となり、それ以上グループ数を増やしても効果が薄いことがわかる。これは、オリジンサーバとユーザの距離が元々近い場合、担当グループの衛星を経由しない可能性が高くなるからである。

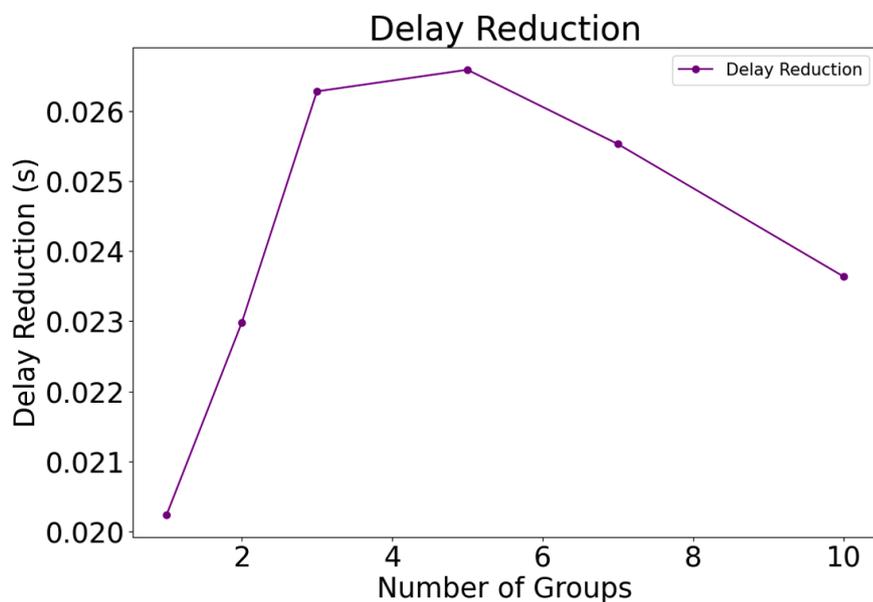


図 4.7: グループ数の変化に伴う遅延削減量の変化

第5章 まとめ

LEO 衛星ネットワークにおいてアップリンクスループットが低いという課題に対して LEO 衛星にキャッシュを設置し、衛星からのキャッシュ配信が有効であると考えた。そこで、従来の地上キャッシュと LEO 衛星キャッシュの違いに着目し、LEO 衛星ネットワークにおいてもコンテンツ人気度の空間的な局所性に対応できるキャッシュ制御法を提案した。シミュレーションにより、提案方式が従来の地上キャッシュ方式と比較してキャッシュヒット率・遅延減少量の観点から優れていることを確認した。今後は、より詳細なシミュレーション環境のもとシミュレーションをする予定である。

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] M. Hosseinian, J. P. Choi, S.-H. Chang, and J. Lee, “Review of 5g ntn standards development and technical challenges for satellite integration with the 5g network,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 8, pp. 22–31, 2021.
- [2] https://www.soumu.go.jp/main_content/000972973.pdf
- [3] <https://www.starlink.com/jp>
- [4] R. Wang, X. Peng, J. Zhang, and K. B. Letaief, “Mobilityaware caching for content-centric wireless networks: Modeling and methodology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 8, pp. 77–83, 2016.
- [5] S. Traverso, M. Ahmed, M. Garetto, P. Giaccone, E. Leonardi, and S. Niccolini, “Unravelling the impact of temporal and geographical locality in content caching systems,” *IEEE Trans. Multimedia*, vol.17, no.10, pp.1839–1854, Oct. 2015.
- [6] Din I. U., Hassan S., Khan M. K., et al. Caching in information-centric networking: strategies, challenges, and future research directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1443-1474.
- [7] H. Wu, J.Li, A Two-layer Caching Model for Content Delivery Services in Satellite-terrestrial Networks, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2016*
- [8] J. Li, K. Xue, D. S. L. Wei, J. Liu, and Y. Zhang, “Energy efficiency and traffic offloading optimization in integrated satellite/terrestrial radio access networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2367–2381, 2020.
- [9] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, “Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 48–56, Jun. 2021.
- [10] H.Lee, J. Heo, and J. Son, Weighted Caching Strategy for LEO Satellite Communication Systems, *International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications 2023*
- [11] Z. Zheng, J. Liu, and W. Deng, An ICN-based Strategy with Delay-Optimized Cache Replacement in LEO Satellite Networks, *International Conference on Communications in China (ICCC)*
- [12] T.Zang, S. Wang, S. Chen, X. Zhang, Z. Wang, F. He, Inter-satellite Cache Push Scheme Based on ICN for Low Orbit Earth Satellite Network. In *Proceedings of the 2023 11th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech)*, Qingdao, China, 30 July–1 August 2023; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2023; pp. 290–295.
- [13] H3 hexagonal hierarchical spatial index. <https://eng.uber.com/h3/>.
- [14] Z. Lai, H. Li, and J. Li, STARPERF: Characterizing Network Performance for Emerging Mega-Constellations, *IEEE 28th International Conference on Network Protocols (ICNP)*
- [15] PD. Bhattacharjee and A. Singla. Network topology design at 27,000 km/hour. In *Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies*, pages 341–354, 2019.
- [16] OpenStreetMap contributors. Data © OpenStreetMap contributors. Available at: <https://nominatim.org/>.
- [17] Gridded Population of the World (GPW). NASA EarthData. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/data/catalog/sedac-ciesin-sedac-gpwv4-popdens-r11-4.11>.
- [18] Countries, Continents, and Languages, prepared by Annexare Studio. Licensed under MIT License. Available at: <https://github.com/jfreyberg/Countries>.

-
- [19] SimpleMaps. World Cities Data. Available at: <https://simplemaps.com/data/world-cities>.
- [20] Statista. Most Visited Websites Worldwide. Available at: <https://jp.statista.com/statistics/1357292/most-visited-websites-worldwide>.

学会発表リスト

- 岡崎直人, 上山憲昭, “LEO 衛星の局所的キャッシュ法“, 電子情報通信学会 2024 年 ソサイエティ大会, 埼玉, 2024 年 9 月
- 岡崎直人, 上山憲昭, “LEO 衛星ネットワークにおける需要の空間的局所性を生かす キャッシュ制御法“, 第 28 回 ICN 研究会, 兵庫, 2024 年 12 月
- 岡崎直人, 上山憲昭, “LEO 衛星ネットワークにおける需要の空間的局所性を活かす キャッシュ制御法“, 電子情報通信学会 NS 研究会, 沖縄, 2025 年 3 月