

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

Optimal Content Placement Method Considering Popularity for Low Earth Orbit Satellite Caching

西嶋 航

上山 憲昭

Haku Nishijima

Noriaki Kamiyama

立命館大学 情報理工学部 情報理工学科

Faculty of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1. はじめに

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、世界的な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 [1]。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。

2. 提案手法

本研究では、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近隣の衛星キャッシュ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、要求先の衛星の近くに存在する場合、コンテンツが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、高人気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、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配置し、配信ホップ数を低減することである。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全体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変化させる配置方法を提案する。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. 想定条件

極軌道コンステレーションを採用した衛星群を想定し、軌道数は 12 個、各軌道内の衛星数は 49 個に設定する。全ての衛星がキャッシュを保持しており、各衛星のキャッシュ容量はコンテンツ 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。1000 個のコンテンツが存在し、各コンテンツ m が各配信要求時に確率 q_m で選択され、 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。

各コンテンツ m に対して配置間隔を定義する。経度方向の配置間隔を x_m とし、軌道 x_m 本ごとに 1 個、コンテンツを配置する。同様に緯度方向の配置間隔を y_m とし、同一軌道内の衛星 y_m 個ごとに 1 個、コンテンツを配置する。衛星ネットワークは地球全土をカバー可能であり、発生する配信要求は必ず衛星に送られるものとする。これらの想定のもと、各コンテンツの配置間隔 x_m と y_m から計算される推定キャッシュヒット率を $1/(x_m * y_m)$ とする。各コンテンツ m に対しそれぞれ

推定キャッシュヒット率を計算し、推定キャッシュヒット率に各コンテンツの要求比率 q_m を掛けた値の総和を、遺伝的アルゴリズムにおける適応度とする。すなわち、遺伝的アルゴリズムにおける適応度 F は、

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

で計算される。これを最大化するよう x_m, y_m の最適化を試みる。適応度の計算時に、キャッシュ容量の制約条件について判定が行われる。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、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。

4. 性能評価

図 1 は遺伝的アルゴリズムの実行結果である。遺伝的アルゴリズムは、1 世代ごとの個体数 10 個、遺伝子の交叉確率 80%、突然変異確率 0.1% で 10 万世代実行される。交叉には一様交叉を採用した。横軸に世代数を対数スケールで表示し、縦軸に各世代で最も高い適応度を表示している。最後の世代に含まれる個体の中で、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。

最も高い適応度を持つ個体について、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る。

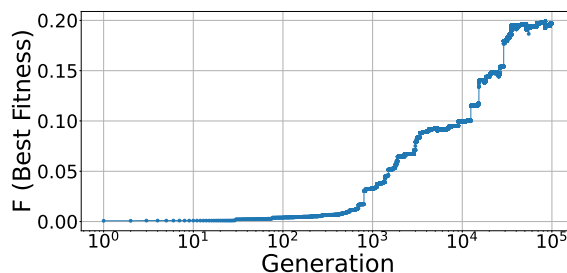


図 1: Result of GA

5. まとめ

低軌道衛星キャッシュに対し、コンテンツの人気度を考慮した配置法の提案を行った。今後はシミュレータを利用したキャッシュヒット率の評価と、配信に必要な平均ホップ数の評価を行う。また、他のコンテンツ配置手法との比較を行う。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K11086, 23K21664, 23K28078 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] Songshi Dou, "Enabling Practical and Pervasive Content Delivery from Emerging LEO Mega-Constellations", IEEE International Conference on Multimedia and Expo, July 2024