

低軌道衛星群を活用した市民参加型インフラストラクチャの構築に関する研究

Building Civil Infrastructure Utilizing LEO Constellation Satellites

荒堀 真生子^{*1}
Araori Makiko

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士課程 2 年

This study aims to build satellite-based communication and broadcast system as an infrastructure in space with LEO constellation small satellites. This network can instead of grand station one and contribute to our daily, safe and secure life. The agents are Personal Satellites (PS) with each mission and make the Personal Satellite Network (PSN) utilizing the amount of communication free space of the PS. The utilization makes cost down and us feel close to space development and the use. The goal of this study is make the feasibility clear by the simulation results with various models of requests to send and PS constellation.

1. 背景と意義

研究のモチベーションとなる背景として以下の3点を想定する。

▶ 小型衛星の普及

小型衛星が近年ますます身近なものになってきており、安く早く開発できる環境が整いつつあることと、それに加えて、受注から1週間程度で小型衛星を打ち上げるシステムの実現により、打ち上げ運用までの期間も短縮されている。この流れから、ゆくゆくは小型衛星を宇宙機関や企業としてではなく、個人として所有するという時代がくることも想定できる。今後、低軌道上の小型衛星の数はますます増える。

▶ 送信要求の多様化

宇宙空間のネットワークはこれまで、災害時の警報や監視において活用されてきている。一方で、現在インターネットでアップロードサイトを利用し、音声や画像・動画といったオリジナルコンテンツを世界中に発信するというある種の文化が生まれつつある。このことから、広帯域通信での送信要求は災害時の緊急性を伴うものから、日常の娯楽性を伴うものまで、多様化が進んでいる。

▶ ネットワークの柔軟性に対するニーズの高まり

上記2点の背景から、ニーズの多様化が加速し、それにともない、様々なQoS (Quality of Service: 通信品質要求) が混在するネットワークの構築を考えた場合、広域性、同報性、高速性、多様なトラフィックの特徴に対応する適応性、柔軟性に対するニーズが高まる。

これらの背景から本研究には、以下の意義があると考えられる。

● 低軌道にちらばる PS を活用するという、地上に完全にとってかわる宇宙空間ネットワークシステムを提案し、その可能性と課題を明らかにする。

● 空き容量を使うことで、自分の衛星を本来のミッション遂行の傍ら、データ中継機能を果たし通信インフラの一片

となるという「参加型」にすることで、より身近に宇宙活用を意識できる。

● 中継のみ目的とした衛星だけから構成されるのではなく、次々打ち上げられる衛星を新たなエージェントとして構成されることを前提としているために柔軟性を持っている。

このように、本システムのための衛星を打ち上げるのではなく、すでに軌道上にある多数の衛星の通信空き容量を有効活用し、多様な送信要求とそのネットワークに対するニーズに対応できる、大規模な参加型のインフラストラクチャを構築することで、より身近に役立つ宇宙利用の実現を目指す。

2. システム概要

以下のような流れのシステムを構築する。

- ① 各簡易地上局でアップリンク
- ② 通信可能範囲にありかつ空き容量のある PS がデータを受信
- ③ 受信したさまざまな種類のデータを優先すべき項目でグルーピング
- ④ 送信要求に応じて最適経路探索
- ⑤ 最適経路で他の PS にデータを中継
- ⑥ 対象地域が通信可能範囲にある PS がデータを送信
- ⑦ 各簡易地上局でダウンリンク

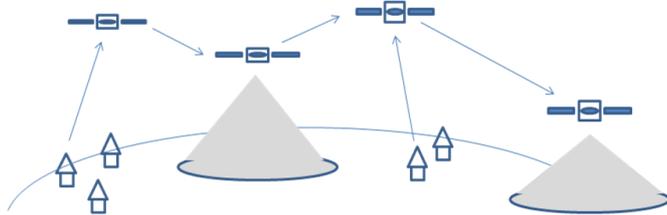


図1 概要図

アップリンクは各家庭に設置可能なレベルの簡易地上局から行えるようにし、地上ネットワークの完全な代替としてのシステムを想定する。

所属先住所: 東京都文京区本郷7-3-1

メールアドレス: arahori@ailab.t.u-tokyo.ac.jp

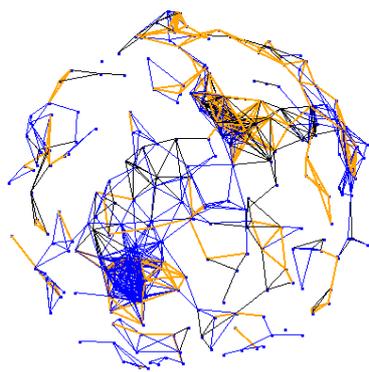


図2 概観図 [加藤 09]

3. データのグルーピング

送信要求のモデルとして、あらゆる情報をカテゴライズし、要求に応じてパラメータの重みづけを変化させる多目的離散値最適問題として解く。関数値が小さいほど評価が高くなるような定式化をおこなう。

評価値をデータ本体に付加し、通信可能範囲に入った PS のうちできるだけ値が小さくなるような中継先を選択するという方法で、その都度 PS がオンラインで評価関数を更新し、ネットワークを最適化するという形をとる。

具体的には、カバーエリア・容量・時間・中継回数・経路長などのパラメータを用いられる。送信要求データの特徴に応じて、それぞれに重みづけを行った上でそれぞれの要求に応じた評価関数を用いてオンラインで（衛星が軌道上でデータを受信する都度最適な中継先衛星を探索する）経路選択評価値を計算し、経路の最適化を図る。

3.1 警報用

災害警報（観測センターから特定地域へ）
 有事警報（偵察衛星から特定地域へ）
 デブリ接近警報（デブリ監視ネットワークの地上局から全世界へ）

3.2 観測用

災害観測（観測衛星から特定地域へ）
 気候変動観測（観測衛星から特定地域へ）
 航路観測（観測衛星から特定地域へ）
 偵察（観測衛星から特定地域へ）

3.3 娯楽用

一方向の放送（個々の家庭から特定地域へ）

3.4 バックアップ用

双方向の通信（個々の地上局と特定地域）

3.5 経路選択に関わる特徴

データのグルーピング方法についての検討を進めると同時に、送信要求の特徴を、できるだけ独立なパラメータを用いて評価関数に反映できるよう数種類に分類する

	警報用	監視用
完了時間最短化	要	不要
場所特定	不要	要
中継回数最小化	不要	要
容量	小	並
中継頻度	ランダム	定期的
ブッキング時の優先度	1番目	3番目

	娯楽用	バックアップ用
完了時間最短化	要	要
場所特定	要	要
中継回数最小化	要	要
容量	大	大
中継頻度	ランダム	ランダム
ブッキング時の優先度	4番目	2番目

場所特定性が不要：ばらまくようにダウンリンクするという。それぞれの PS は送信要求を受けた時点で場所にかかわらずダウンリンクする

4. 衛星間通信

4.1 通信計画

時刻 t における衛星 i と j との距離を $d_{ij}(t)$ とし、通信可能距離を d_{limit} とすると、リンク行列は

$$L(t) = \begin{cases} 1(i \neq j, d_{ij}(t) \leq d_{limit}) \\ 0(i \neq j, d_{ij}(t) > d_{limit}) \end{cases} \quad (1)$$

と規定できる。このとき衛星間の最大通信容量はそれぞれの衛星の通信容量を c_i, c_j とすると

$$BR_{ij} = \min\{c_i, c_j\} \quad (2)$$

となる。ある通信ミッションで要求されたデータ通信量 D を、次式を満足するように配分するのが、PSN 通信計画である。

$$x_{ij}(t) = \sum z_k(t) \quad (3)$$

$$\sum_{t_k^s}^{t_k^f} z(t) = D$$

$$0 \leq x_{ij} \leq BR_{ij}$$

$x_{ij}(t)$ は時刻 t における衛星 i および j 間のそのものの通信量、 t_k^s, t_k^f はミッション k の開始時刻と終了時刻、 Z は時刻 t における通信ミッション k のデータ通信量である。

4.2 ネットワークトポロジ

PS はフォーメーション（編隊飛行）状態ではなく、それぞれのミッションごとに軌道制御は独立であるため、コンステレーション状態でのネットワークを考える。それぞれの衛星は固有のミッションをもっており、基本的には各衛星の軌道はランダムなため、

PSN 全体のトポロジの周期性は低い。ただし、それぞれの衛星の軌道は予測可能なのでネットワークポロジの変化も予測可能である。よって、次のネットワークポロジにおける複数の仮想のコネクションを用意しておき、それらを適切なタイミングで切り替えて中継に使う方式を考える。

4.3 今後の方針

送信要求に応じた経路探索アルゴリズムを適用し、最適経路探索を行った結果を表示し、特徴を定量的に表し実現可能性を見積もる

参考文献

- [津田 2002] 津田雄一: 情報管理と誘導側の関係を考慮した大規模衛星群フォーメーションフライトアーキテクチャに関する研究, 東京大学学位論文, 2002.
- [小林 2000] 小林俊二, 蛭子恵介, 梅原大祐, 川合誠: 低軌道衛星システムと地上網を統合したネットワークモデルに関する検討, 電子情報通信学会, 2000.
- [松下 2005] 松下章, 佐藤太郎, 湯本功, その他: 離島通信および災害対策に適用するインフラ衛星通信システム, 電子情報通信学会, 2005.
- [加藤 2009] 加藤博光: 人間・機械協調計画立案システムに関する研究, 東京大学学位論文, 2009.