

卒業論文 2024 年度（令和 6 年度）

ContactPlan の臨時更新の天体内への限定的な伝播の提案

慶應義塾大学 環境情報学部
鈴木 翔太

ContactPlan の臨時更新の天体内への限定的な伝播の提案

本論文では、宇宙における遅延・途絶耐性ネットワーク (Delay/Disruption Tolerant Network : DTN) において、ルーティングの基本概念となっている Contact Graph Routing (CGR) に必要な Contact Plan の更新に関し、リンク障害が起きた場合にその天体内に情報伝播を限定することを提案する。近年宇宙開発が大きく進展しており、特に NASA 中心のアルテミス計画では 2020 年代後半以降、月・火星において有人基地や周回軌道のステーションの建設なども予定され、2030 年代以降、月・火星に順次通信を行うノードの数が増加することが見込まれる。しかし現状の地球外のノードとの通信は地上アンテナとの 1 対 1 の直接的な通信であり、今後月や火星にノードが増加した際には対応できない。そのため直接的な通信のみに頼らず、衛星などの宇宙のノードによる通信網、すなわち宇宙インターネットの必要性が認識されており、その通信網における技術として既存のインターネット技術を適用することが検討されている。ただし通信の視点において宇宙環境は、大きな遅延・頻繁な断絶などが存在し、地球の既存のインターネットは前提が大きく異なるため、上記の DTN というコンセプトが構想されている。

また宇宙インターネットにおいて、そのネットワークを構成するノードの多くは宇宙機であり、通信可能なリンクは時間によって変化するものの、そのタイミング等は軌道計算により予測可能であるという特徴をもつ。このため DTN におけるルーティングは、基本的に上記でも述べた CGR を用いることが計画されている。CGR では、各ノードは自らを含めた全ての衛星に関して、特定の 2 ノードの通信可能な機会 (Contact) のリストである Contact Plan を事前に保持しており、これを元にアルゴリズムで経路の計算を行い、Next hop となる DTN ノードを決定し転送を行う。そのため Contact Plan が適切にノードに配布され適宜更新されていることが必要になるが、その配布手法について標準化はなされていない。本研究では、Contact Plan の更新を、更新が必要となるタイミングに基づいて定期更新と臨時更新に分類しており、臨時更新による DTN のルーティング上のメリットは既に先行研究で明らかになっている。しかし先行研究では異なる天体間ネットワーク間でもこの臨時更新の情報伝搬を行なっている。本研究ではこれを天体内に留めることを提案する。

以下、仮綴後に評価と結果について述べる予定です。

キーワード:

1. Delay/Disruption Tolerant Network 2. Contact Graph Routing

慶應義塾大学 環境情報学部
鈴木 翔太

Proposal for limited propagation of ContactPlan temporary updates within the planet

This paper is concerned with updating the Contact Plan required for Contact Graph Routing (CGR), which is the basic concept of routing in the Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) in space. We propose to limit the propagation of information within a celestial body in the event of a link failure. Space development has made great progress in recent years, and in particular, the construction of manned bases and orbiting stations on the Moon and Mars is planned after the late 2020s under the NASA-centered Artemis Project, and the number of nodes communicating to the Moon and Mars is expected to increase sequentially after the 2030s. However, the current communication with extraterrestrial nodes is direct one-to-one communication with ground antennas, which cannot cope with the increase in the number of nodes on the Moon and Mars in the future. Therefore, the need for a communication network using space nodes such as satellites, i.e., the Space Internet, rather than relying only on direct communication, has been recognized, and the application of existing Internet technologies to such a communication network is being considered. However, from a communications perspective, the space environment is subject to large delays and frequent disconnections, and the assumptions underlying the existing Internet on Earth are very different, so the concept of the DTN described above is being considered. In the space Internet, many of the nodes that make up the network are spacecraft, and although the links that can communicate with each other change with time, the timing of such changes can be predicted by orbital calculations. For this reason, routing in the DTN is basically planned to use CGR as described above. In CGR, each node maintains in advance a Contact Plan, which is a list of possible communication opportunities (Contacts) between two specific nodes for all satellites including itself, and calculates routes based on this Contact Plan using an algorithm to determine the DTN node that will be the next hop and performs forwarding. Therefore, it is necessary for the Contact Plan to be properly distributed to the nodes and updated as necessary, but there is no standardization of the distribution method. In this study, contact plan updates are classified into periodic updates and occasional updates based on the timing of when updates are necessary, and the benefits of occasional updates for DTN routing have already been clarified in previous studies. However, previous studies have also propagated the information of occasional updates between different inter-object networks. We propose to keep this within a celestial body.

Keywords :

1. Delay/Disruption Tolerant Network 2. Contact Graph Routing

Keio University Bachelor of Arts in Environment and Information Studies
Shota Suzuki

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の概要	1
1.2	本研究の目的と構成	2
第2章	宇宙インターネットにおける DTN 技術とそのルーティング	3
2.1	近年の宇宙開発の進展	3
2.1.1	アルテミス計画	3
2.1.2	アルテミス計画以外の月探査計画	4
2.1.3	アルテミス計画以外の火星探査計画	4
2.1.4	深宇宙の探査計画	4
2.1.5	民間事業者の宇宙事業への参画	5
2.2	宇宙通信におけるインターネット技術の適用可能性	5
2.3	通信における宇宙の環境	6
2.3.1	大きな遅延のある通信環境	6
2.3.2	ネットワークトポロジーの変動と間欠的接続	6
2.4	Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN)	6
2.4.1	通信機会の非対称性	7
2.4.2	宇宙における DTN	7
2.4.3	Bundle Protocol	7
2.4.4	IPN address	8
2.4.5	Convergence Layer と LTP	8
2.4.6	既存の DTN 実装	8
第3章	DTN におけるルーティングの研究と課題	10
3.1	CGR を用いたルーティングの運用	10
3.1.1	運用計画の決定	10
3.1.2	Contact Graph Routing	11
3.2	CGR におけるルーティングのアルゴリズム	11
3.2.1	Yen routing algorithm	12
3.2.2	CGR に代替するアルゴリズム	12
3.3	Contact Plan の更新	13
3.3.1	Contact Plan の定期更新	13
3.3.2	Contact Plan の臨時更新	13

3.4	問題提起	14
第4章	Contact Plan の臨時更新の惑星内への限定的な伝播の提案	15
4.1	Contact Plan の臨時更新における要件	15
4.1.1	要件 1: 臨時更新による経路収束までに要する時間の短縮	15
4.1.2	要件 2: 経路収束後の到達遅延の短縮	15
4.2	要件に対する先行手法と本研究の提案手法との比較	15
第5章	提案手法の実装とシミュレーションの環境	17
5.1	Omnet++ と DTNsim を用いた評価環境	17
5.1.1	2040 年代の DTN を想定したシナリオとパラメータ	17
5.1.2	シミュレーションで用いるバンドルトラフィック	17
5.1.3	リンク障害のシナリオ生成	18
5.2	Contact Plan の臨時更新の実装	18
第6章	評価手法と結果	19
6.1	本提案の評価概要と予想	19
6.2	シミュレーション結果	19
6.2.1	経路収束までの所要時間	19
6.2.2	経路収束後の到達遅延	19
第7章	結論と展望	24
7.1	本研究のまとめ	24
7.2	今後の課題と展望	24
	謝辞	25
	付録	28

目 次

2.1	アルテミス計画におけるステーションの投入予定軌道	4
2.2	各国の火星探査計画	5
2.3	DTN を搭載したノード間のみでの通信	7
3.1	4つのノードからなる DTN の例	11
3.2	3.1 における Contact Plan の例 (Contact に関する表記)	12
3.3	3.1 における Contact Plan の例 (Range に関する表記)	12
3.4	3.1 における Contact Graph の例	13
5.1	本実験で用いるトポロジー	18
6.1	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (地球・月間のシミュレーション)	20
6.2	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (地球・火星間のシミュレーション)	20
6.3	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (火星・火星の衛星間のシミュレーション)	21
6.4	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (地球・月間のシミュレーション)	21
6.5	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (地球・火星間のシミュレーション)	22
6.6	ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (火星・火星の衛星間のシミュレーション)	23

表 目 次

2.1 DTN 実装とその機能の比較	9
------------------------------	---

第1章 序論

1.1 本研究の概要

本論文では、宇宙における遅延・途絶耐性ネットワーク（Delay/Disruption Tolerant Network：DTN）において、ルーティングの基本概念となっている Contact Graph Routing（CGR）に必要な Contact Plan の更新に関し、リンク障害が起きた場合にその天体内に情報伝播を限定することを提案する。近年宇宙開発が大きく進展しており、特に NASA 中心のアртеミス計画では 2020 年代後半以降、月・火星において有人基地や周回軌道のステーションの建設なども予定され、2030 年代以降、月・火星に順次通信を行うノードの数が増加することが見込まれる。しかし現状の地球外のノードとの通信は地上アンテナとの 1 対 1 の直接的な通信であり、今後月や火星にノードが増加した際には対応できない。そのため直接的な通信のみに頼らず、衛星などの宇宙のノードによる通信網、すなわち宇宙インターネットの必要性が認識されており、その通信網における技術として既存のインターネット技術を適用することが検討されている。ただし通信の視点において宇宙環境は、大きな遅延・頻繁な断絶などが存在し、地球の既存のインターネットは前提が大きく異なるため、上記の DTN というコンセプトが構想されている。

また宇宙インターネットにおいて、そのネットワークを構成するノードの多くは宇宙機であり、通信可能なリンクは時間によって変化するものの、そのタイミング等は軌道計算により予測可能であるという特徴をもつ。このため DTN におけるルーティングは、基本的に上記でも述べた CGR を用いることが計画されている。CGR では、各ノードは自らを含めた全ての衛星に関して、特定の 2 ノードの通信可能な機会（Contact）のリストである Contact Plan を事前に保持しており、これを元にアルゴリズムで経路の計算を行い、Next hop となる DTN ノードを決定し転送を行う。そのため Contact Plan が適切にノードに配布され適宜更新されていることが必要になるが、その配布手法について標準化はなされていない。本研究では、Contact Plan の更新を、更新が必要となるタイミングに基づいて定期更新と臨時更新に分類しており、臨時更新による DTN のルーティング上のメリットは既に先行研究で明らかになっている。しかし先行研究では異なる天体間ネットワーク間でもこの臨時更新の情報伝搬を行なっている。本研究ではこれを天体内に留めることを提案する。

以下、仮綴後に評価と結果について述べる予定です。

1.2 本研究の目的と構成

本研究では Contact Plan の臨時更新の範囲を、リンク障害発生 of 該惑星内に限定することにより、Contact Plan の臨時更新の本来の目的である、該ネットワーク内での Bundle の配送遅延が増加することを防ぎ、かつ他天体にまでリンクの更新情報を知らせることで経路収束までの時間が大きく増大してしまうことを回避している。本論文においては、これ以降、以下のような構成をとる。

1 章では、本論文の概要、目的及び構成を述べる。2 章では、本論文を読むにあたって必要となる宇宙開発の動向、通信に関わる宇宙環境、DTN の諸知識について説明する。3 章では、本論文の背景となる DTN におけるルーティングと、取り組む課題について説明する。4 章では、課題に対する解決策が満たすべき要件と、これらの要件に対する提案する手法の対応について説明する。5 章では、本論文の提案する手法について、実装方法とそのシミュレーション環境について説明する。6 章では、提案手法が 4 章で述べた要件を満たすかについて、それぞれどのような評価を行うかについて説明し、その結果を示す。7 章では、本論文における結論と今後の展望について述べる。

第2章 宇宙インターネットにおける DTN技術とそのルーティング

2.1 近年の宇宙開発の進展

宇宙開発は近年大きく進展している。1970年代に米ソによって月探査が進展した後、その後月面、特に有人による探査は中断されていたが、2004年にブッシュ大統領は米国の新宇宙政策を発表し、2020年までに米国が再び宇宙飛行士を月面に送り、有人滞在施設の建設することを提唱した。[14] この計画は実際には中断されたものの、2017年にトランプ大統領が有人月探査・火星探査を進める大統領令に署名し、2019年にアルテミス計画として発表された。[11] 2020年には「アルテミス計画を含む広範な宇宙空間の民生探査・利用の諸原則について、関係各国の共通認識を示すこと」を目的にアルテミス合意[16]も成立し、当初日本・アメリカ・カナダ・イギリス・イタリア・オーストラリア・ルクセンブルク・アラブ首長国連邦の8カ国が参加した。[19] 加盟国はその後増加し、2024年時点で40カ国である。[12] このように近年宇宙開発は急激に進展しており、その進展について以下の2.1.1、2.1.2、2.1.4、2.1.5の視点からそれぞれ詳述する。

2.1.1 アルテミス計画

アルテミス計画はアルテミス1の4段階に分かれた計画がされている。アルテミス1では無人の計画であり、NASAが新たに開発した大型ロケットであるSpace Launch System (SLS) と有人ミッションの際に人を収容する部分であるOrionの実証試験として、月の周りを周回しその後地球に帰還する。アルテミス2以降は有人の計画であり、アルテミス2では実際の宇宙飛行士がOrionに乗り込み、SLSで打ち上げられ月の周りを周回する。アルテミス3では月の南極域に宇宙船と飛行士を着陸させ、周辺の探査を行う。アルテミス4では月の軌道に宇宙飛行士の滞在も可能なステーションを構築する。図この軌道はNear Rectilinear Halo Orbit (NRHO) と呼称される近月点4000km、遠月点75000kmの超楕円軌道であり、地上局常時可視性、月南極の準常時可視性、軌道の安定性、月面へのアクセス性（時間、必要推進薬量）に優れている[15]。

アルテミス5ではさらにローバーによる月面探査などが計画されている。アルテミス計画は当初の計画よりも遅延が発生しているものの、アルテミス1は2022年11月16日に打ち上げられ、25日後の12月11日に地球に帰還した。アルテミス2は2026年4月に、アルテミス3は2027年中旬に予定されている。アルテミス計画ではNASAのみならず、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA）、欧州宇宙機関

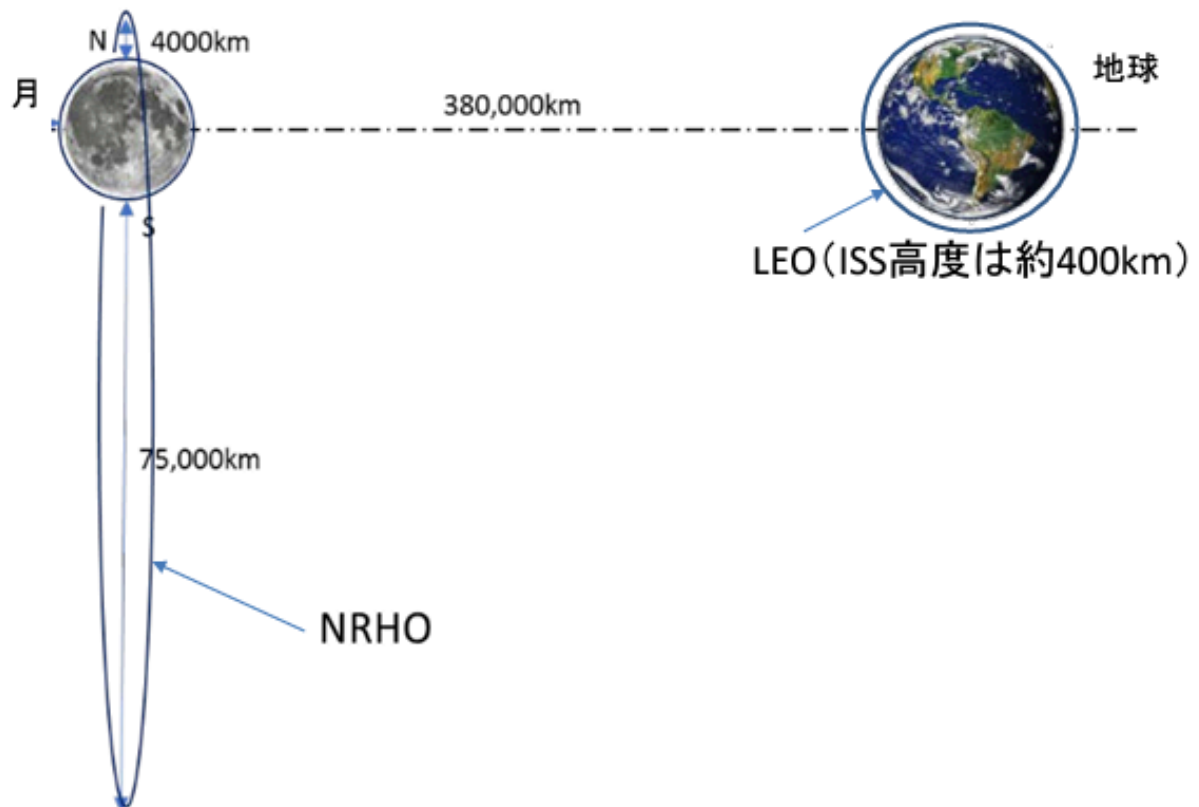


図 2.1: アルテミス計画におけるステーションの投入予定軌道

(European Space Agency : ESA)、カナダ宇宙庁 (Canadian Space Agency : CSA) も主要な開発に参加している。[17]

2.1.2 アルテミス計画以外の月探査計画

このセクションでは中国主導の宇宙開発計画である ILRS について述べる。

2.1.3 アルテミス計画以外の火星探査計画

アルテミス計画以外にも火星探査計画は各国宇宙機関により計画・実施されている。2.2 JAXA はこの中でも珍しく火星の衛星に着目しており、火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration : MMX) では、衛星フォボスでのサンプルリターンを実施予定である。

2.1.4 深宇宙の探査計画

このセクションでは、火星以遠の探査計画、特に小惑星探査やそのほか木星土星の衛星探査についても詳述する。

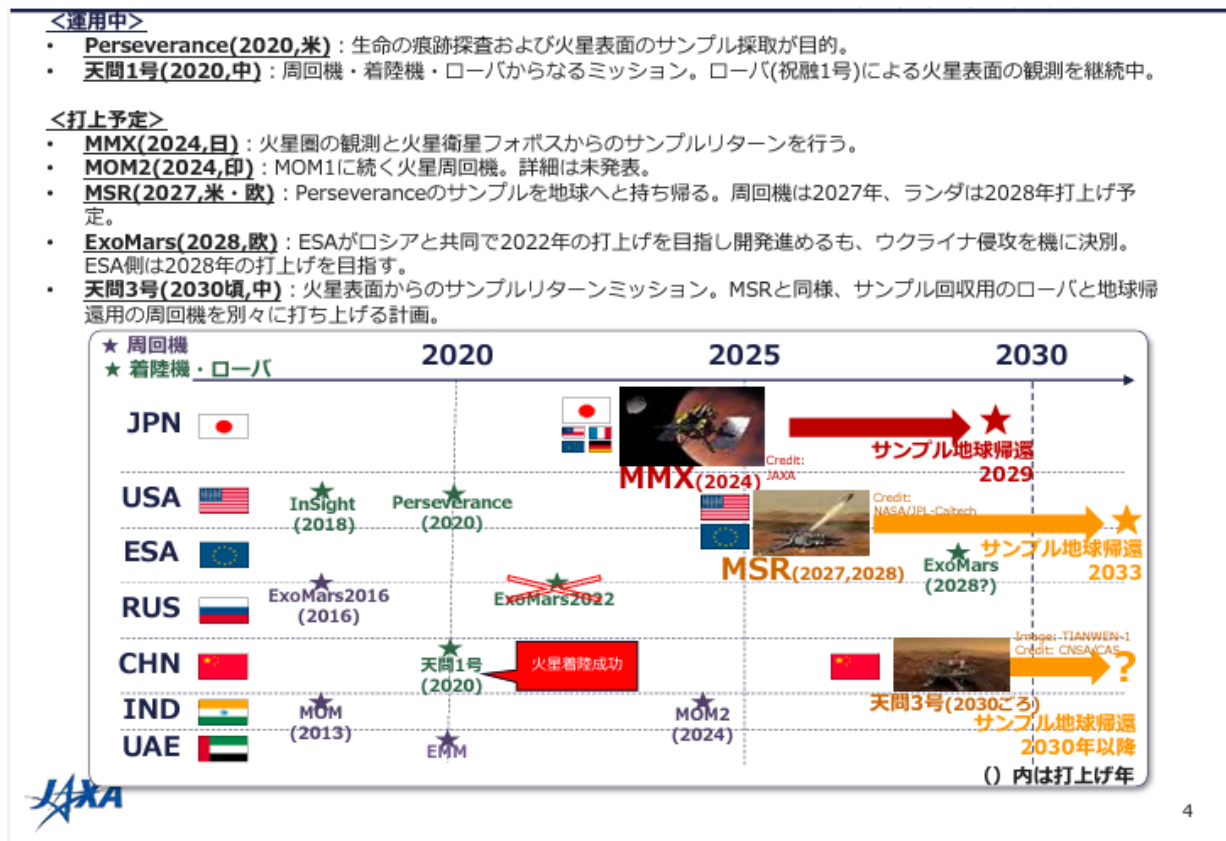


図 2.2: 各国の火星探査計画
[18] の 4 ページ目より引用

2.1.5 民間事業者の宇宙事業への参画

このセクションでは、2000 年代の民間事業者の宇宙事業への参入について詳述する。特に、スペース X、ブルーオリジン、ヴァージンギャラクティックなどの宇宙への輸送能力をもつ企業の成長について述べる。宇宙ビジネスの事業規模の拡大を示すとともに、今後地球軌道でのビジネスだけでなく、月・火星でのビジネスも進展し、そこでの通信需要が生まれるという話を記述する。メモ:JAXA のイノベーションハブについても述べる

2.2 宇宙通信におけるインターネット技術の適用可能性

これらの宇宙開発計画に伴い、月・火星の地表及びその近傍の空間に多くの人や宇宙機、その他機材が存在するようになり、天体内・天体間での通信需要が大きくなることが予想される。従来までの宇宙ミッションにおいて宇宙のノードと地球との通信は、地球上にある各国の大型アンテナを利用し、一対一の通信を行っていた。しかしこのような計画でノードの数が増加する場合、通信ニーズに対応するためには宇宙にも多対多のノードで通信が可能な宇宙インターネットが必要となる。これに向け、既存のインターネット

の技術を宇宙インターネットに向け改良し活用することが検討されているが、当然ながら宇宙環境は地球とは環境が大きく異なり、特に以下の部分に関して考慮が必要となる。

2.3 通信における宇宙の環境

宇宙環境は地球環境とは多くの点において異なるが、通信やネットワークに関しては 2.3.1 や 2.3.2 のような違いが重要となる。

2.3.1 大きな遅延のある通信環境

宇宙での通信は既存のインターネットにおける通信の遅延に比較して非常に大きい。東京-ニューヨーク間であれば、伝搬遅延のみを考慮した場合、片道 50ms 以内で通信が可能である一方、宇宙における通信の際には地球月間でも片道 1.3 秒、地球火星間では太陽に対する 2 天体の公転の状況によって変動するが最大 20 分程度の遅延が想定されている。End-to-End で TCP を用いた通信を行う際には、3-way-handshake などを含めこれらの天体間を複数回往復する通信を行う必要があり、遅延はさらに大きな時間になる。[10] また火星の衛星フォボスとダイモスについては、火星地表との平均距離がフォボスで 9378km、ダイモスが 23459km となっているため、光速を 313000km/s と仮定すると、それぞれ 0.030 秒、0.075 秒程度未満の通信遅延が発生する。

2.3.2 ネットワークトポロジーの変動と間欠的接続

宇宙のインターネットにおいて、ネットワークを構成するノードには多くの宇宙機が含まれている。これらのノードは当然ながら宇宙空間での位置が常に変化しており、天体の影に入るなどで断絶が頻繁に起こる。

2.4 Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN)

これらの宇宙環境におけるインターネットのコンセプトとして、Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN) が構想されている。DTN の中心となる技術の一つに RFC9171[4] で標準化された Bundle Protocol (BP) があり、BP では通信されるデータはバンドルという可変長のデータとして転送される。中間ノードでは経路上の次のノードへ転送可能なタイミングまでバンドルを蓄積することが可能になっているため、End-to-End の通信疎通性が確保できていない場合でも、この蓄積による転送を行うことにより断絶に強い通信ができる。またトランスポートレイヤに UDP などのプロトコルを用いることで、比較的遅延を抑えて通信することもできる。[9]

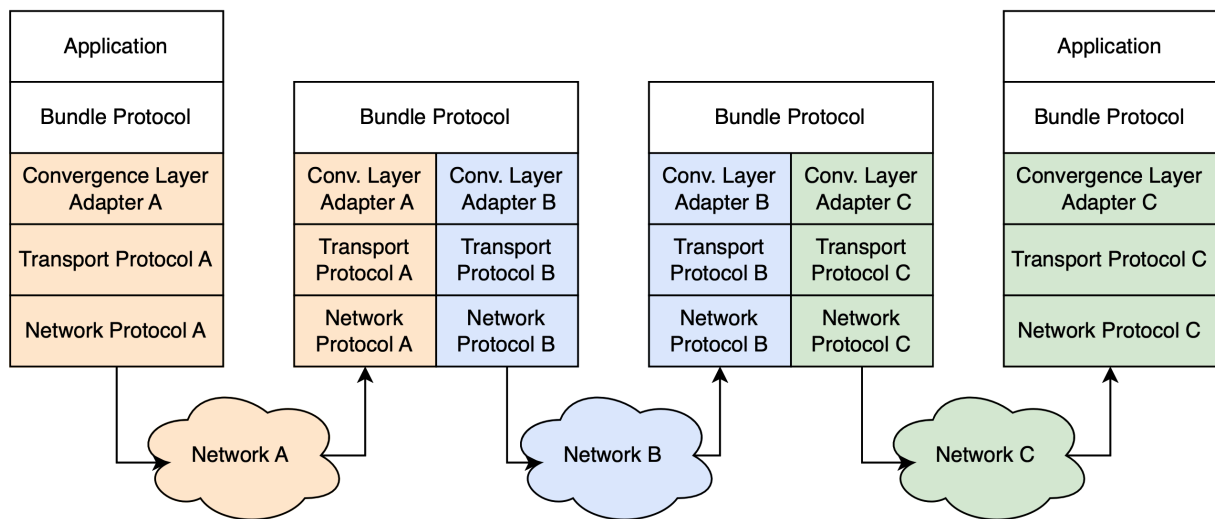


図 2.3: DTN を搭載したノード間のみでの通信

参考文献 [9]Figure1 より引用。図中の Convergence Layer (CL) については 2.4.5 で説明する。

2.4.1 通信機会の非対称性

2.4.2 宇宙における DTN

DTN は当初惑星間インターネットのアーキテクチャのコンセプトとして構想された。しかし RFC 4838[13] において、Delay Tolerant Networking という言葉を使用した頃から、地上無線ネットワークへの適用も構想されるようになった。これらの環境と宇宙環境での DTN の大きな違いとして、通信機会のタイミングが挙げられる。3.1.2 でも述べるが、宇宙環境での DTN においてはノード間の通信機会は全て予測可能なものである一方、地上無線ネットワークでの通信機会は予測が難しいものであり、そのためルーティングの手法なども異なる。本研究では宇宙のインターネットにおけるルーティング手法に注目しているため、以後は地上無線ネットワークにおける DTN ではなく、宇宙インターネットで用いる DTN について議論する。

2.4.3 Bundle Protocol

上記でも述べた BP は、DTN における主要な通信技術で遅延・断絶が起きやすい環境でデータを確実に伝送するために設計された。このバンドルは、送信元から目的地までの途中で複数の中継を経ても、全体としてデータを確実に届けるためのものである。また、このプロトコルは「ストア&フォワード」方式を利用しており、各中継ノードが受け取ったバンドルを一時的に保存し、次のノードと通信できるタイミングが来るまで待機する。これにより、通信が一時的に途絶えてもデータが失われることなく、次のノードへと送信される。

2.4.4 IPN address

IPN アドレス (Interplanetary Networking Address) は、DTN 環境で使用されるアドレス形式で、宇宙通信のためのネットワーク識別とエンドポイントの識別を可能にするものである。従来のインターネットプロトコルアドレス (IP アドレス) は、リアルタイムでの通信や短い遅延を前提とした設計であるため、宇宙空間における遅延や断絶が発生する環境では適切に機能しない。DTN のアーキテクチャは、これらの遅延や断絶を前提としており、IP ネットワークとは異なる方法でデータを伝送するため、IPN アドレスが必要とされている。さらに、IPN アドレスは地上のインターネットや宇宙のネットワークなど、異なるアドレッシングスキームを持つネットワークの統合する役割としても機能する。

IPN アドレスは「ipn: ノード番号. サービス番号」という形式で記述され、これにより特定の宇宙船や装置が個別に識別される。

2.4.5 Convergence Layer と LTP

DTN では多様なプロトコルがトランスポートレイヤ以下の層で使用することを想定しており、図 2.3 中の Convergence Layer はそれらの違いを吸収することを目的としている。Convergence Layer Protocol (CLP) としては、利用する下位レイヤプロトコルにより、

- TCP-based CLP (TCPCL)
- User Datagram Protocol (UDP)-based CLP (UDPCL)
- Saratoga CLP
- Licklider Transmission Protocol (LTP)-based CLP (LTPCL)

などがある。LTP[3] はコンバージェンスレイヤのプロトコルの一つであり、再送制御の機能も実装している。LTP をコンバージェンスレイヤに用いる場合、トランスポートレイヤに UDP を用いることがあるほか、宇宙での通信において LTP が直接リンク層にアクセスすることも想定されている。

2.4.6 既存の DTN 実装

既にいくつかの研究機関などにより DTN 技術を実装したソフトウェアがリリースされている。いくつかの例を以下に示す。

- Interplanetary Overlay Network DTN (ION-DTN) : NASA/JPL
- HDTN : NASA/Glenn research center
- DTN ME : Marshall Space Flight center

- μ D3TN : D3TN GmbH
- IONe : Experimental ION Scott Burleigh United States
- DTN7/Go : University of Marburg German

これらの DTN ソフトウェアは、基本的に通信内容からバンドルへのエンコード・デコード、中間ノードでのバンドルのままでの蓄積転送を可能にしているが、Convergence Layer が対応しているトランスポートレイヤプロトコルの種類などの点で異なる。これらの実装についての比較についてを表 2.1 に示す。

Feature/Stack - Subfeature	ION	IONe	HDTN	μ D3TN	DTNME	CFS	Unibo	IBR
BPv6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y
BPv6 - TCPCLv3	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	Y
BPv6 - UDPCL	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	Y
BPv6 - LTPv1	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	N
BPv6 - BPSEC	Y	Y	N	N	N	-	N	Y
BPv6 - Custody BPv6	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	N
BPv7	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
BPv7 - TCPCLv3	Y	Y	Y	Y	Y	-	Y	N
BPv7 - TCPCLv4	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	N
BPv7 - UDPCL	Y	Y	Y	Y	Y	-	N	N
BPv7 - LTPv1	Y	Y	Y	Y	Y	-	Y	N
BPv7 - BPSEC	Y	Y	Y	N	N	-	N	N
BPv7 - Custody (with BIBE)	Y	Y	N	Y	Y	-	N	N
BPv7 - RTP	N	N	Y	N	N	-	N	N
CGR, SABR	Y	Y	Y	N	N	-	Y	Y
CCSDS SPP	N	N	N	Y	N	-	N	N
BSSP	Y	Y	N	N	N	-	N	N
AMS	Y	Y	N	N	N	-	N	N
IPv6 (for CLAs)	N	Y	Y	N	N	-	Y	Y
IPND	Y	Y	N	N	N	-	N	Y
CFDP	Y	Y	N	Y	Y	-	N	N
Language	C	C	C++	C	C++	C	C++	C++

表 2.1: DTN 実装とその機能の比較

参考文献 [2]figure1 より引用

第3章 DTNにおけるルーティングの研究と課題

2.3.2 項で述べた通り、宇宙のネットワークにおけるノードの多くは衛星であり、その位置は常に変動する。そのためノード間の通信は特定の時間にのみ可能なものであり、この間欠的なリンクを順次利用して転送し End-to-End のデータグラムの転送を行う必要がある。DTN では、特定の 2 つのノード間の通信が可能なこの時間やタイミングを Contact と呼び、軌道計算などにより事前に計画された Contact を次々と利用して転送を行う Contact Graph Routing (CGR) [7] というコンセプトが構想されている。既に述べた通り既存の DTN 実装は複数あるが、これらの DTN 実装におけるルーティング手法でも主に CGR が用いられ、宇宙データ通信システムに関わる国際標準化検討委員会である宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS : Consultative Committee for Space Data System) では SCHEDULE-AWARE BUNDLE ROUTING [5] として標準化されている。

本章では DTN における CGR とその研究について分類し、現状の課題について説明する。

3.1 CGR を用いたルーティングの運用

DTN で CGR を用いたルーティングを運用する場合、その運用プロセスは以下の 3 つの段階に大別できる。1 つ目の段階は運用計画の決定、2 つ目はルート決定、3 つ目は実際のバンドルの転送である。

3.1.1 運用計画の決定

1 つ目の段階では、ミッションコントロールなどを担う地上局など（以後、マスターノードとする）が、各ノードの軌道計算やその他の情報に基づいて Contact Plan を作成する。宇宙におけるノードの物理的な軌道は計算により予測可能であり、2 ノード間の Contact も事前に計算することが可能である。CGR の例として、3.1 のような A から D の 4 つのノードからなるトポロジーの DTN を考える。マスターノードは軌道計算によるこれらのノードの位置や、搭載する機材の性能等をもとに Contact Plan を作成する。Contact Plan には、Contact についての記述と Range についての記述が含まれ、Contact についての記述では、特定の 2 ノードの通信機会についての通信開始・終了時間、データレートなどが記載され（図 3.2）、Range についての記述では特定の 2 ノードの物理的な距離について記載される（図 3.3）。ただし 2.4.1 項で述べた通り、宇宙における特定の 2 ノード間の通信

機会は非対称であるため、Contact Plan に記載される通信機会は、特定の 2 ノードについての両方のリンクの通信可能機会ではなく、片方向のリンクについての通信機会である。

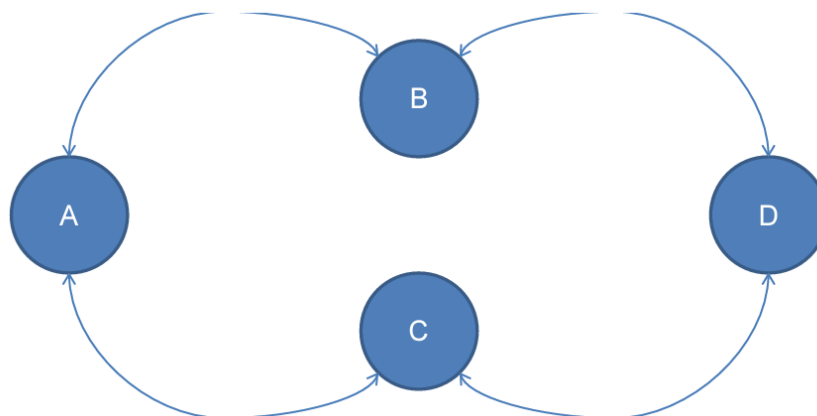


図 3.1: 4 つのノードからなる DTN の例

参考文献 [5]figure3-1 より引用

ノード A からノード D に向けた Bundle を配送する場合、これらの Contact Plan から Bundle の配送の状態遷移について 3.4 を得られる。CGR では DTN の経路途中のノードは Contact Plan を保持しており、この一連の計算によって各 Bundle の転送先を決定する。

3.1.2 Contact Graph Routing

2 章では、宇宙開発の進展に伴う宇宙のインターネットの必要性と、そこで用いられることが構想されている DTN 技術について説明した。しかし DTN 技術は今まで実際に宇宙空間で使用された実績・及び使用される計画が少なかったこともあり、実際の運用においては未だ多くの課題が残されている。CGR はその分野の一つであり、大きく分けて、Contact Plan から経路計算を行う際のアルゴリズムと、それに必要な Contact Plan の配布手法についてが課題となる。本章ではこの 2 つの課題についてそれぞれ先行研究をまとめるとともに、本研究のテーマとしている Contact Plan のアップデートについての課題について説明する。

3.2 CGR におけるルーティングのアルゴリズム

現状 DTN でのルーティングは基本的に CGR が用いられており、CGR では経路計算の際には基本的にダイクストラが用いられている。しかし他のアルゴリズムの使用や、パラメータを変更することによる改善方法が複数研究されており、本セクションではその内容についてまとめる。

Contact	Sender	Recvr	From	Until	Rate
1	A	B	1000	1100	1000
2	B	A	1000	1100	1000
3	B	D	1100	1200	1000
4	D	B	1100	1200	1000
5	A	C	1100	1200	1000
6	C	A	1100	1200	1000
7	A	B	1300	1400	1000
8	B	A	1300	1400	1000
9	B	D	1400	1500	1000
10	D	B	1400	1500	1000
11	C	D	1500	1600	1000
12	D	D	1500	1600	1000

図 3.2: 3.1 における Contact Plan の例 (Contact に関する表記)

参考文献 [5]figure3-2 より引用。Sender は送信元のノードの識別子、Receiver は受信元のノードの識別子、From は Contact の開始時刻、Until は終了時刻、Rate は転送速度を示す。

Sender	Recvr	From	Until	Range (light seconds)
A	B	1000	1100	1
A	C	1100	1200	30
B	D	1400	1500	120
C	D	1500	1600	90

図 3.3: 3.1 における Contact Plan の例 (Range に関する表記)

参考文献 [5]figure3-3 より引用。

3.2.1 Yen routing algorithm

Fraire らはルーティングテーブルの管理手法について研究を行い、これに基づき現状の CGR は基本的に Yen Routing Algorithm を用いている。[8]

3.2.2 CGR に代替するアルゴリズム

Efficient Contact Graph Routing Algorithms for Unicast and Multicast Bundles [6]

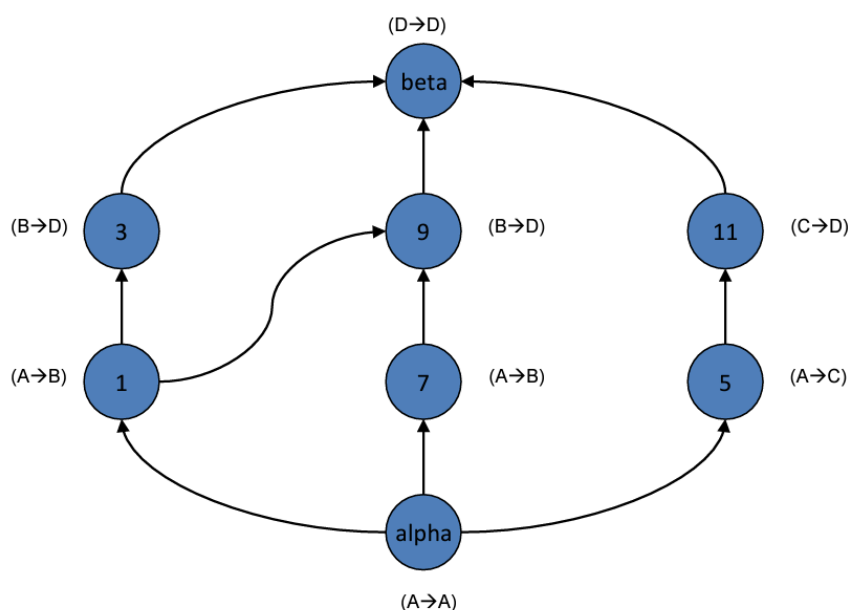


図 3.4: 3.1 における Contact Graph の例

参考文献 [5]figure3-4 より引用。

3.3 Contact Plan の更新

このように CGR のアルゴリズム・パラメータについての研究は多く行われているが、これらは Contact Plan をもとに経路を計算手法の研究であり、経路計算を行いたいノードにおいてそもそも Contact Plan が存在していることが前提となる。そのため、Contact Plan をノードに配送する手法が必要となるが、Contact Plan はその性質上、更新が必要であり、定期更新と臨時更新に分けて考えることができる。

3.3.1 Contact Plan の定期更新

Contact Plan は有限時間内での Contact について記述したものであり、その時間以降の Contact Plan に関しては定期的に更新する必要がある。ただし、Contact Plan に記載されるノードの全てが周期的な運動のみを行う場合には Contact Plan を繰り返し使える可能性がある。

3.3.2 Contact Plan の臨時更新

ここでは故障時などの Contact Plan の臨時更新について述べる。先行研究として [1] を用いる。

3.4 問題提起

3.3.2 で述べたように、想定された Contact に失敗が発生した場合、その情報を DTN の他のノードに拡散し Contact Plan を更新することで、DTN の各ノードはその時点におけるネットワークの最新のトポロジーと一致する Contact Plan を保持することができ、これによりより適する経路がある場合これを選択することが可能になる。しかし実際にリンク障害などが発生した場合、DTN の各ノードにその情報の拡散が完了する時間は、拡散を開始するノードから CGR によってその情報を格納したバンドルが到達する時間によって決まる。そのため天体間にまたがる DTN を運用しており、それらの全てノードに通知を行うことを想定した場合、2.3.1 で述べた天体間の遅延と、さらにその天体内での Contact Plan に応じた時間分、障害情報の拡散の完了までには大きな時間を要する。

そのため Contact Plan の臨時更新においては、必要なノードにのみ効率よくその情報を拡散し遅延を抑えることを達成することが求められる。

第4章 Contact Planの臨時更新の惑星内への限定的な伝播の提案

本章では、前章で Contact Plan の臨時更新時に述べた課題に対して、その解決策が満たすべき要件について整理し、Contact Plan の臨時更新の際の情報拡散を惑星内に限定することを提案する。Contact Plan の臨時更新の目的は、DTN の各ノードがその時点におけるネットワークのより正確なトポロジー情報を得て、最適な経路を選択できるようにすることである。DTN のどこかでリンク障害が起きた場合、Contact Plan を

4.1 Contact Plan の臨時更新における要件

ここでは、Contact Plan の臨時更新において満たされるべき要件を整理する。

4.1.1 要件 1: 臨時更新による経路収束までに要する時間の短縮

3.4 で述べたように、リンク障害の発生を検知したノードから、順次他のノードにその情報を通知し Contact Plan を更新していく場合、その情報の到達時間の差によって、保持している Contact Plan、ひいてはそれから計算する最適な経路に、一時的に不整合が生じ得る。この場合、最適な経路で計算できていないため、Bundle の到達遅延が一時的に増加すると考えられる。これが収束するまでの時間は短ければ短いほどよい。

4.1.2 要件 2: 経路収束後の到達遅延の短縮

4.1.1 同様、3.4 で述べたように、臨時更新を行うと一時的に到達遅延が増加することが予想されるが、経路が収束した後は、基本的に到達遅延は一定の値に安定すると考えられる。この到達遅延はできるだけ短いほど良い。

4.2 要件に対する先行手法と本研究の提案手法との比較

定性的に考えると、上記の要件 1・2 に対し、既存手法と本研究の提案手法では、以下のようになることが考えられる。

- 要件 1 について

既存手法では天体間での情報拡散による臨時更新を行うが、当然これは大きな遅延を超えた上でせねばならず、経路収束までの時間が非常に大きくなることが予想される。

- 要件 2 について

提案手法ではリンク障害が発生した当該天体以外にはその情報を拡散しないため、他の天体には現状により即した *Contact Plan* は提供されておらず、そのため既存手法と比較した場合、経路収束後の到達遅延はより大きくなることが予想される。

第5章 提案手法の実装とシミュレーションの環境

5.1 Omnet++とDTNsimを用いた評価環境

Omnet++はネットワークシミュレータの構築を目的としたオープンソースのプラットフォームであり、既存の通信プロトコルや物理層のシミュレーションを実装しているほか、各ノードにC++でのアプリケーションを実装し拡張することが可能である。DTNsimはOmnet++のフレームワーク上で動作するDTNのシミュレーターであり、ION-DTN、HDTNなどの種々のDTN実装が動作するネットワークをシミュレートすることができ、各種CGRのバリエーションにも対応する。そのため本研究ではこのOmnet++とDTNsimを用いて宇宙で運用されているDTNをシミュレーションを行う。

5.1.1 2040年代のDTNを想定したシナリオとパラメータ

本実験においては、2040年代の複数の天体間にまたがるDTNを運用していることを想定し、そのうち任意の2天体間について既存手法と本研究の提案手法の実装とシミュレーションを行い、本研究の提案の有効性について検証する。そのため任意の2天体間のDTNネットワークとして、図5.1のようなトポロジーを想定する。ノード1から3は天体A、ノード4から6はそれぞれ天体Bに属するDTNノードであり、ノード1と6はそれぞれの地表DTNのノード、ノード2から5はそれぞれの天体の軌道上にある宇宙のDTNノードである。

5.1.2 シミュレーションで用いるバンドルトラフィック

本実験では図5.1のトポロジーにおいて、ノード1からノード6に向かう、すなわち天体Aの地上DTNネットワークから天体Bの地上DTNネットワークに向けてのトラフィックを想定する。生成するバンドルのトラフィック量は、実験ごとにランダムに生成を行っている。ただし生成するバンドルについて、それぞれ範囲等を絞って生成している。以下にそれぞれを示す。

- バンドル生成イベントごとのバンドルの生成数 (bundlesNumber)
- バンドル生成イベントの開始タイミング (start)

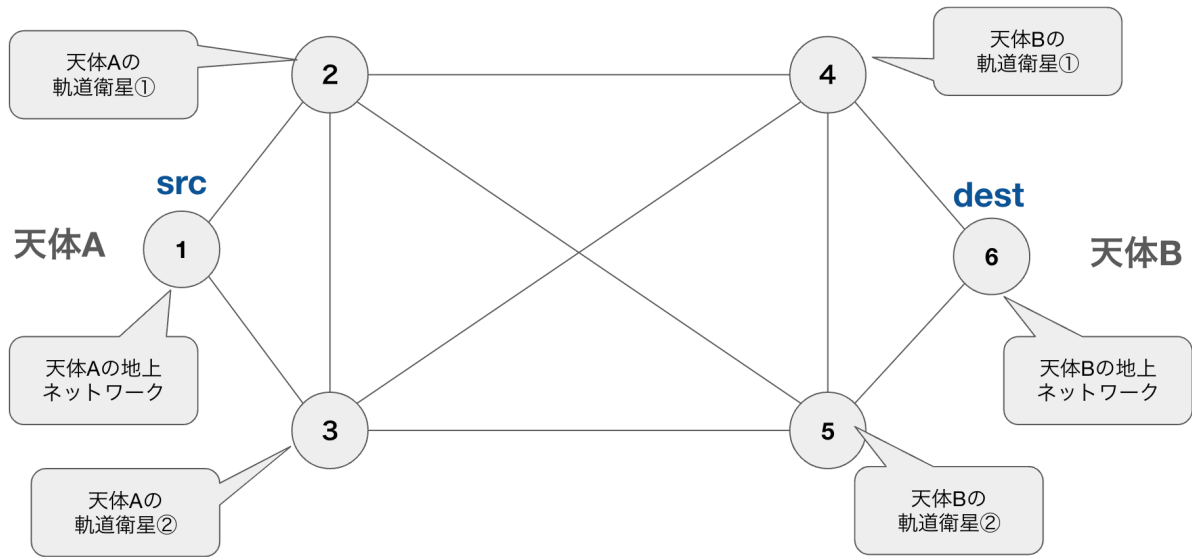


図 5.1: 本実験で用いるトポロジー

ノード 1 は天体 A の地上 DTN ネットワークを代表したノード、ノード 2 とノード 3 は天体 A の軌道上に存在する宇宙の DTN ノード、ノード 4 とノード 5 は天体 B の軌道上に存在する宇宙の DTN ノード、ノード 6 は天体 B の地上 DTN ネットワークを代表したノードを示す。

- 生成したバンドルの目標ノードの endpoint ID (destinationEid)
- バンドル生成イベントごとのバンドルのサイズ (size)

5.1.3 リンク障害のシナリオ生成

リンク障害のシナリオ作成には、omnetpp で実装されている Fault サブモジュールを用いる。

5.2 Contact Plan の臨時更新の実装

Contact Plan からのリンクの削除と追加は、omnetpp で実装されている Central サブモジュールを用いる。

第6章 評価手法と結果

6.1 本提案の評価概要と予想

4.1.1 で述べた通り、リンク障害による配送遅延の増加の発生後、Contact Plan の臨時更新を行うと、そのリンク情報がすべてのノードに伝搬し再計算が行われる時間の間、一時的に Contact Plan の不整合が発生する。

6.2 シミュレーション結果

本章では、5 で述べたシミュレーションにおける結果についてまとめる。6.2.1 では、4.1.1 で述べた経路収束までの所要時間についてのシミュレーション結果について、6.2.2 では4.1.2 で述べた経路収束後の配送遅延についてのシミュレーション結果について述べる。

6.2.1 経路収束までの所要時間

4.1.1 で述べた通り、リンク障害による配送遅延の増加の発生後、Contact Plan の臨時更新を行うと、そのリンク情報がすべてのノードに伝搬し再計算が行われる時間の間、一時的に Contact Plan の不整合が発生し、経路収束までの所要時間の間は遅延が大きくなることが予想される。

6.2.2 経路収束後の到達遅延

4.1.2 で述べた通り、リンク障害による配送遅延の増加の発生後、Contact Plan の臨時更新を行うと、そのリンク情報がすべてのノードに伝搬し再計算が行われる時間、すなわち収束までの時間

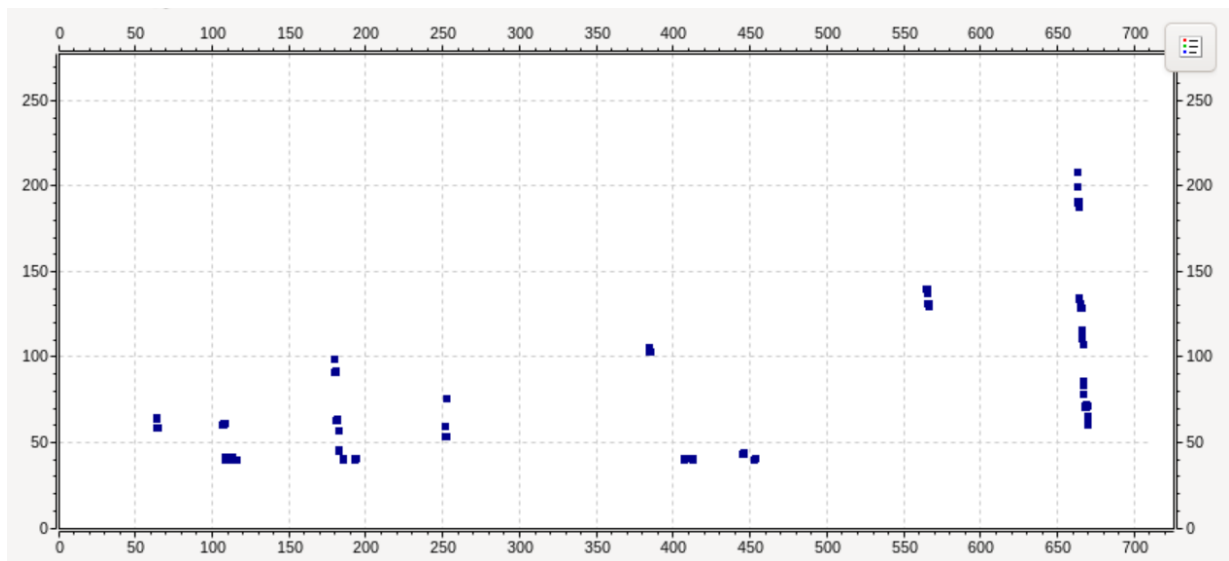


図 6.1: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (地球・月間のシミュレーション)

ノード 6 における、シミュレーション内での全到達 Bundle の到達遅延の最大値・平均値・最小値。本シミュレーションにおいては、5.1.2 で述べたように、ノード 6 に対する Bundle トラフィックのみを生成しているため、ノード 6 のみの到達遅延を示す。

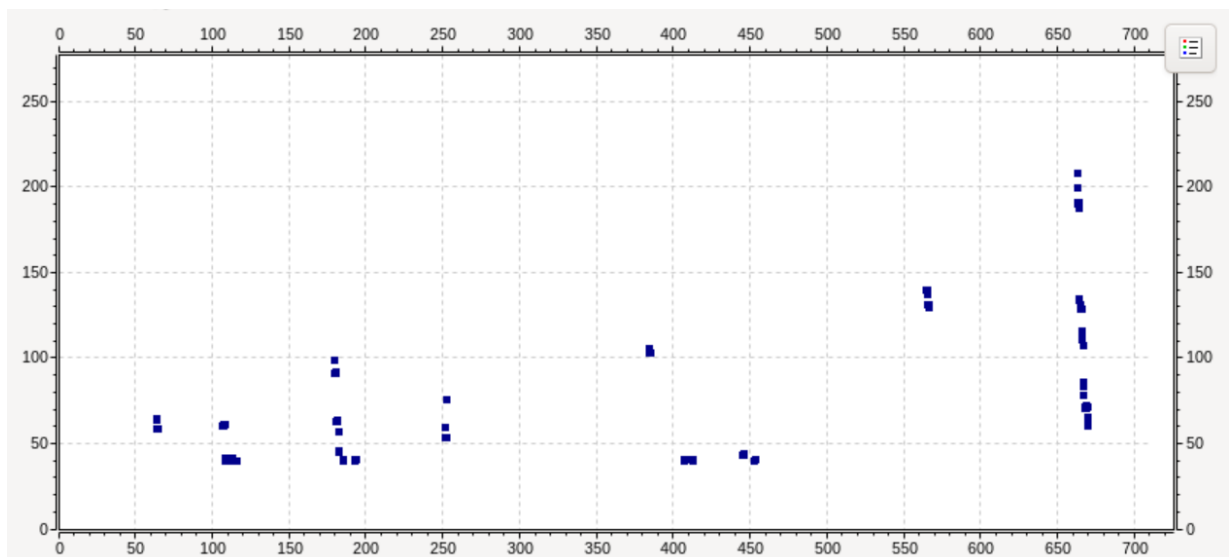


図 6.2: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (地球・火星間のシミュレーション)

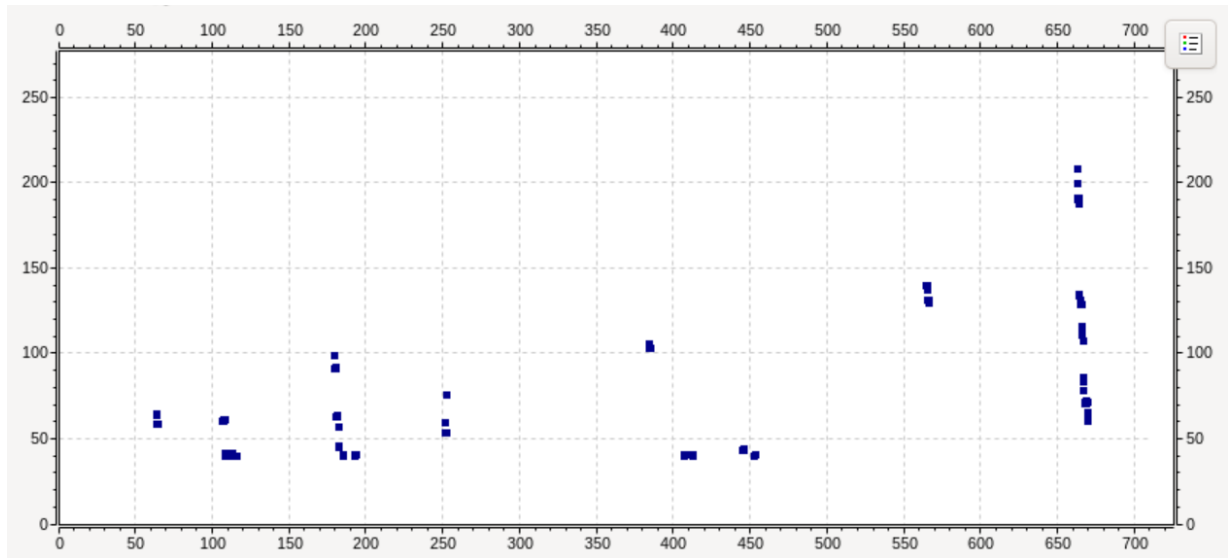


図 6.3: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延の時間変化 (火星・火星の衛星間のシミュレーション)

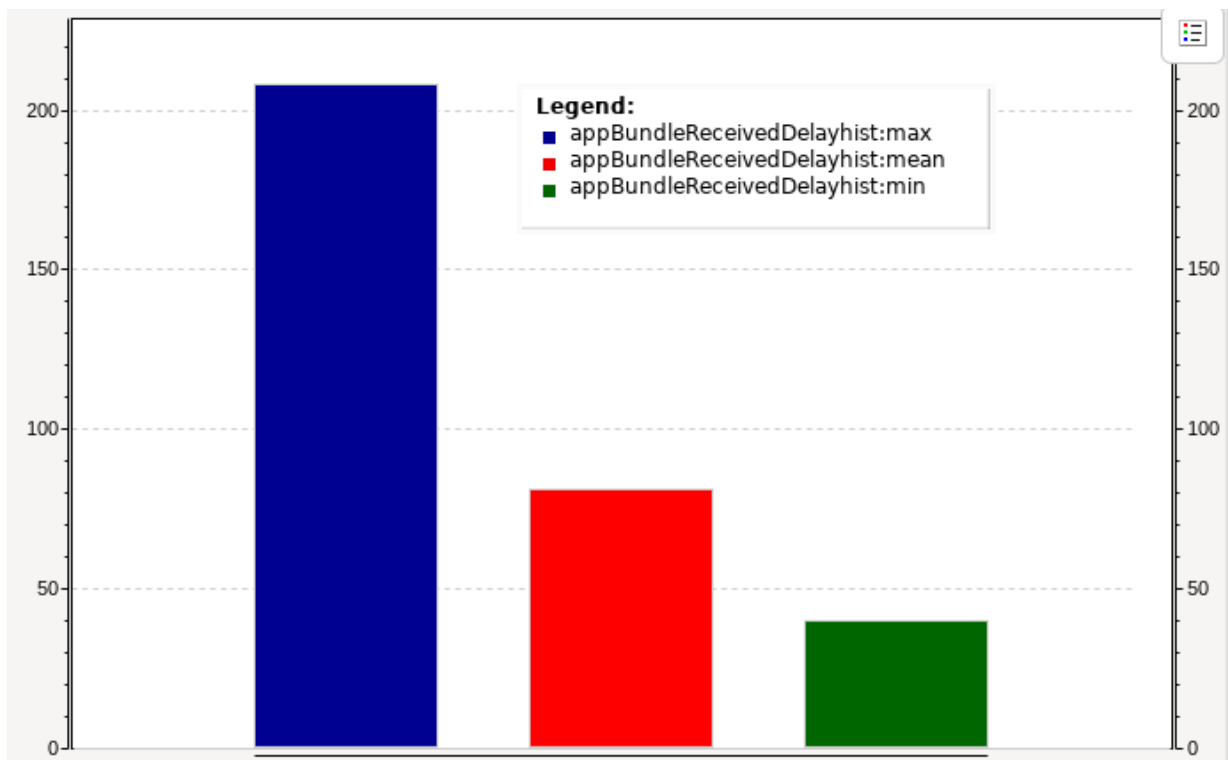


図 6.4: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (地球・月間のシミュレーション)
ノード 6 における、シミュレーション内での全到達 Bundle の到達遅延の時間変化??同様
ノード 6 のみの到達遅延を示す。

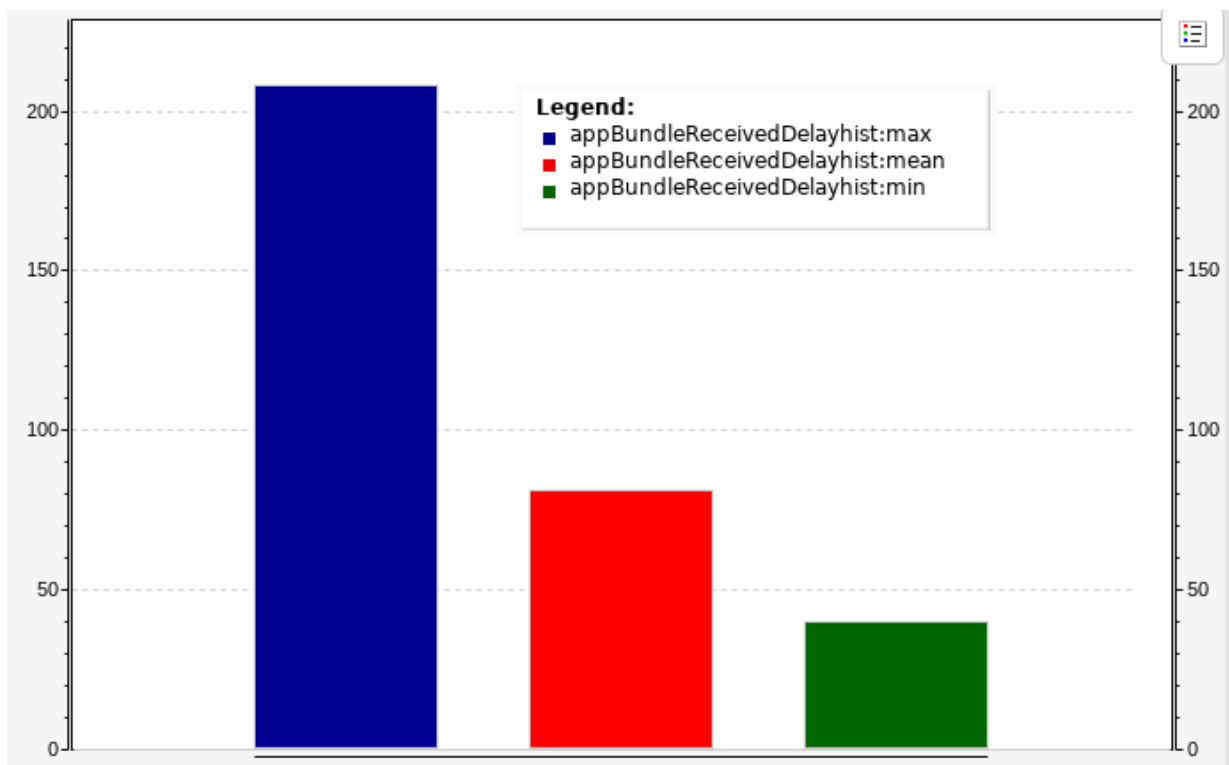


図 6.5: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (地球・火星間のシミュレーション)

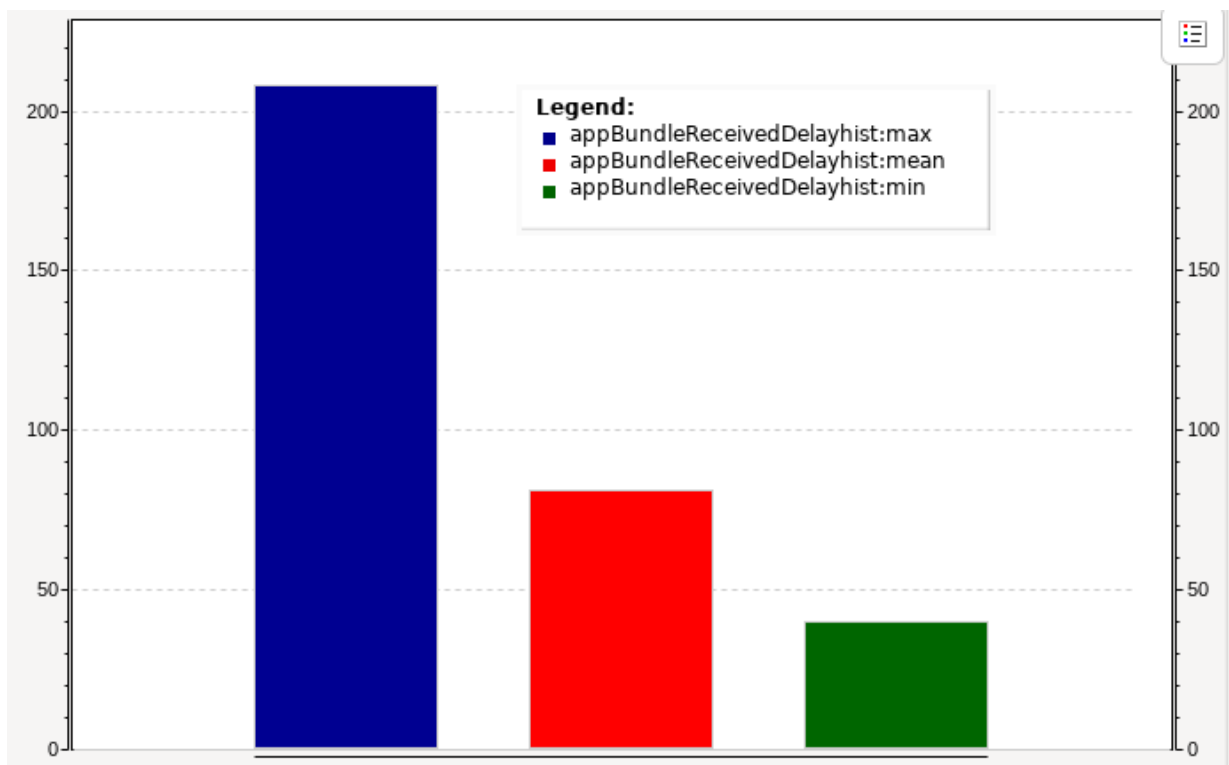


図 6.6: ノード 6 に向けた Bundle の到達遅延 (火星・火星の衛星間のシミュレーション)

第7章 結論と展望

7.1 本研究のまとめ

ここでは本研究全体を総括する。先行研究に対する本研究の立ち位置を再度明確にするとともに、結果から明らかになった優位性について再度まとめる。

7.2 今後の課題と展望

今後の課題と展望について述べる。主に、臨時更新のみならず定期更新の際から天体間をASとして切り分ける必要性について述べる。

謝辞

論文の執筆にあたり、ご指導賜りました慶應義塾大学教授 村井純博士、環境情報学部教授中村修博士、同学部教授楠本博之博士、同学部教授高汐一紀博士、同学部教授 Rodney D Van Meter 博士、同学部教授 三次仁博士、同学部教授 中澤仁博士、同学部准教授 大越匡博士、政策・メディア研究科特任教授 鈴木茂哉博士に感謝致します。

特にほぼ全てが未経験の状態です。学部3年時に icar に飛び込んでからの2年間、長期目標も二転三転し基礎知識もあやふや、あげく手も中々動かさずにいた私に、研究のすすめ方から長期的な行動指針に至るまで、叱咤激励しながらご指導頂いた環境情報学部教授 植原啓介博士と東海大学観光学部、政策・メディア研究科特任准教授、佐藤雅明博士のお二人に感謝申し上げます。WIDE プロジェクト SpaceWG の活動を通じご指導を賜りました、東京大学大学院総合文化研究科 准教授 石原知洋博士にも感謝申し上げます。また APIE プログラムへの SA としての参加や、WIDE プロジェクトでの活動範囲を広げる機会を何度も広げてくださった工藤紀篤博士に感謝申し上げます。

SpaceWG の活動で苦楽を共にした内田祥喜氏、Tony Chen 氏をはじめとする関係者の皆様、インターネット自動車研究グループ ICAR でお世話になりました、石原匠氏、古本裕一氏、赤間滉星氏、山口泰平氏をはじめとする皆様、またデルタ館において多くの時間を共にした Korry Luke 氏、望月理来氏、竹村太希氏をはじめとする皆様に感謝申し上げます。皆様と学び、議論し、苦境の中でも共にしがき、ラーメンを食べる日々は、刺激的で大変楽しいものでした。

Fraire 氏に感謝します。本論文を執筆するにあたり引用させていただいた CGR 関連の多くの論文、実験データ取得に用いた DTNsim などは氏が整備してくださったものであり、氏の DTN と CGR に対する多大なる貢献なしには本論文は完成し得ませんでした。先人に感謝

私は政策・メディア研究科でもう2年宇宙インターネットの実現に向け努力を続ける所存です。主査としてご指導いただく植原教授、より一層の苦境を共にすることであろう SpaceWG や合同研究会の皆様、今後ともよろしくお願い申し上げます。

最後に、鈴木信章氏、入江智美氏に深く感謝申し上げます。色々な制約がある中、私が学業を続けられるよう、大学入学時から今に至るまで、物心両面で常に応援してくださいました。あと2年は学生期間が続きますが、その後の人生に関しては安心してもらえるよう、これからも精進致しますのでもう少しお付き合い願います。

以上をもって本論文の謝辞とさせていただきます。研究者としても人間としても未熟者ではありますが、ここまでの皆様のご支援に感謝するとともに、改めまして今後ともよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] Nikolaos Bezirgiannidis, Fani Tsapeli, Sotiris Diamantopoulos, and Vassilis Tsaousidis. Towards flexibility and accuracy in space dtn communications. In *Proceedings of the 8th ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks*, CHANTS '13, pages 43–48, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [2] Ronny Bull, Rachel Dudukovich, Juan Fraire, Nadia Kortas, Robert Kassouf-Short, Aaron Smith, and Ethan Schweinsberg. Network emulation testbed capabilities for prototyping space dtn software and protocols. pages 1–8, 05 2024.
- [3] S. C. Burleigh, S. Farrell, and M. Ramadas. Licklider Transmission Protocol - Specification. RFC Editor, RFC 5326, Sep. 2008. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc5326>.
- [4] Scott Burleigh, Kevin Fall, and Edward J. Birrane. "Bundle Protocol Version 7. RFC Editor, RFC 9171, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9171/6>.
- [5] Consultative Committee for Space Data Systems. Schedule-aware bundle routing (sabr), July 2019. CCSDS 734.3-B-1, <https://public.ccsds.org/Pubs/734x3b1.pdf> (accessed 2024/12/15) .
- [6] Olivier De Jonckère. Efficient contact graph routing algorithms for unicast and multicast bundles. In *2019 IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT)*, pages 87–94, 2019.
- [7] Juan A. Fraire, Olivier De Jonckère, and Scott C. Burleigh. Routing in the space internet: A contact graph routing tutorial. *Journal of Network and Computer Applications*, 174:102884, 2021.
- [8] Juan A. Fraire, Pablo G. Madoery, Amir Charif, and Jorge M. Finochietto. On route table computation strategies in delay-tolerant satellite networks. *Ad Hoc Networks*, 80:31–40, 2018.
- [9] Farrera Marcos, Fleury Martin, Guil Ken, and Ghanbari Mohammed. Measurement and analysis study of congestion detection for internet video streaming. *Journal of Communications*, 5, 02 2010.

-
- [10] McBrayer, Katherine, Chai, Patrick, and Judd Emily. Communication delays, disruptions, and blackouts for crewed mars missions. 10 2022.
- [11] NASA. Nasa's lunar exploration program overview, 2020. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/12/artemis_plan-20200921.pdf (accessed 2024/12/14) .
- [12] NASA. Artemis accords reach 40 signatories as nasa welcomes lithuania, 5 2024. <https://www.nasa.gov/news-release/artemis-accords-reach-40-signatories-as-nasa-welcomes-lithuania/> (accessed 2024/12/14) .
- [13] Leigh Torgerson, Scott C. Burleigh, Howard Weiss, Adrian J. Hooke, Kevin Fall, Dr. Vinton G. Cerf, Keith Scott, and Robert C. Durst. Delay-Tolerant Networking Architecture. RFC 4838, April 2007.
- [14] 小田 光茂 and 久保田 孝. 日本の宇宙開発・宇宙探査の技術ロードマップ. **日本ロボット学会誌**, 27(5):482–489, 2009.
- [15] 内閣府. 宇宙政策委員会 宇宙産業・科学技術基盤部会 第 43 回会合 資料 3-1 国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会における検討状況（文部科学省提供資料）（2 / 5）, August 2019. <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai48/pdf/siryoy4-3-1.pdf> (accessed 2024/12/23) .
- [16] 内閣府. アルテミス合意について, 2020. https://www8.cao.go.jp/space/committee/01-kihon/kihon-dai13/siryoy2_4.pdf (accessed 2024/12/14) .
- [17] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)国際宇宙探査センター. アルテミス計画に関する各国の開発状況について, 2021. https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/content/0210630-mxt_uchukai01-000016486_5.pdf (accessed 2024/12/23) .
- [18] 宇宙科学研究所. 火星本星探査構想の検討について, October 2023. <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kagaku/kagaku-dai57/siryoy4.pdf> (accessed 2024/12/23) .
- [19] 総務省. 日・米・加・英・伊・豪・ルクセンブルグ・uae の 8 カ国間で国際宇宙探査に関する宣言、アルテミス合意に署名, 2020. https://www.mext.go.jp/b_menu/activity/detail/2020/20201014.html (accessed 2024/12/14) .

付録

ソースコード 1: inifile

```
1  [General]
2  network = src.dtnsim
3  repeat = 2
4
5  # Simulation end time
6  sim-time-limit = 1000s
7
8  dtnsim.node[*].com.packetLoss = 0.1
9
10 # Nodes quantity (identifiers (EiDs) matches their index, EiD=0 is
    ignored)
11 dtnsim.nodesNumber = 6
12
13 # Node's icons (satellite, receiverdish, server2, antenntower)
14 dtnsim.node[1].icon="receiverdish"
15 dtnsim.node[2..5].icon="satellite"
16 dtnsim.node[6].icon="receiverdish"
17
18 # Nodes's failure rates
19 # dtnsim.node[*].fault.enable = false
20 # dtnsim.node[*].fault.faultSeed = ${repetition}*10
21 # dtnsim.node[*].fault.meanTTF = 20s
22 # dtnsim.node[*].fault.meanTTR = 5s
23
24 # Net Layer (available routing: direct, cgrModel350, cgrModelRev17,
    cgrModel350_Hops, cgrModel350_2Copies)
25 dtnsim.node[*].dtm.routing = "cgrModelRev17"
26 dtnsim.central.contactsFile = "contactPlan/shaw_contact.txt"
27 dtnsim.node[*].dtm.routingType = "routeListType:allPaths-firstEnding
    ,volumeAware:allContacts,extensionBlock:on,contactPlan:global"
28 dtnsim.node[*].dtm.printRoutingDebug = true
29
30 # App Layer (comma separated strings for different traffic
    generators)
31 dtnsim.node[1].app.enable=true
32 dtnsim.node[*].app.custodyTransfer=true
```

```
33      dtnsim.node[1].app.bundlesNumber="1000"  
34      dtnsim.node[1].app.start="0"  
35      dtnsim.node[1].app.destinationEid="6"  
36      dtnsim.node[1].app.size="1500"  
37      dtnsim.node[1].app.interval=1
```
