

卒業論文 2024 年度（令和 6 年度）

Contact Plan の臨時更新情報伝搬の天体内 への限定

慶應義塾大学 環境情報学部

鈴木 翔太

Contact Plan の臨時更新情報伝搬の天体内への限定

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、Contact の失敗が起きた場合にその情報伝播を当該天体内に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的・継続的な配布と臨時更新に分類しており、臨時更新による DTN のルーティングにおける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が、本研究ではこれを天体内に留めることを提案する。シミュレーションの結果、本研究での提案手法でも、先行研究での手法と同等程度の効果が得られることが確認され、情報拡散を天体間でも行うことによる運用上のデメリットを避けつつ、効果的な臨時更新を行うことが可能であることが示された。

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

Limit the propagation of temporary updates of Contact Plan to within celestial bodies.

In this paper, we propose a new concept of contact plan update required for Contact Graph Routing (CGR) in Delay/Disruption Tolerant Networks (DTN) in space. Contact Plan update required for Contact Graph Routing (CGR), which is a basic concept of routing. We propose to limit the propagation of the contact plan in the case of contact failure. Space development has made great progress in recent years, and in particular, the NASA-centered ARTEMIS project is planning to establish a manned base on the Moon and Mars from the late 2020s onward. In particular, the NASA-centered ARTEMIS project plans to construct manned bases and orbiting stations on the Moon and Mars in the late 2020s and beyond, and to establish a space station on the Moon and Mars in the 2030s. The number of communication nodes on the Moon and Mars is expected to increase after the 2030s. However, the current communication with extraterrestrial nodes is a direct one-to-one communication with ground antennas. This is not possible when the number of nodes on the Moon and Mars increases in the future. Therefore, we should not rely only on direct communication. The need for a communication network using space nodes such as satellites, i.e., the Space Internet, has been recognized, and the existing Internet technologies are being used for the communication network. The application of existing Internet technologies to such a communication network is being considered. However, from the viewpoint of communication, the space environment is subject to large latency and frequent disconnection. The above-mentioned concept of DTN has been conceived. Therefore, the concept of DTN is proposed as described above. In addition, in the space Internet, most of the nodes that constitute the network are spacecrafts, and the Although the communication links change with time, the timing of the changes can be predicted by orbital calculations. For this reason, the routing in the DTN is basically planned to be based on CGR as described above. In CGR, each node is responsible for all satellites including itself. Contact Plan, which is a list of possible communication opportunities (Contact) between two nodes, is maintained in advance for all satellites including the node itself. Based on the Contact Plan, a route is calculated by an algorithm to determine the DTN node that will be the next hop and performs forwarding. Therefore, it is necessary that the Contact Plan is properly distributed to the nodes and updated as necessary.

However, there is no standardization on the method of contact plan distribution. In this study, the contact plan is updated periodically based on This study categorizes Contact Plan updates into periodic/continuous distribution and occasional updates based on the timing of when updates are necessary, and classifies them into the following categories The advantages of occasional updates in the routing of DTNs have already been clarified in previous studies. However, in the previous studies, the information propagation of the occasional update is also performed between different inter-object networks. In this study, we propose to keep this propagation within a celestial body. Simulation results show that the proposed method in this study is as effective as the method in the previous study. The simulation results show that the proposed method is as effective as the method used in the previous study, and that the operational disadvantages of the information diffusion among celestial objects are avoided. The simulation results show that the proposed method is as effective as the previous method, and that it is possible to perform effective temporary updating while avoiding operational disadvantages caused by the information diffusion among the celestial bodies.

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とDTN技術	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	5
2.1.4 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	6
2.3 通信における宇宙の環境	7
2.3.1 大きな遅延のある通信環境	7
2.3.2 ネットワークトポロジーの変動と間欠的接続	8
2.4 Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN)	8
2.4.1 宇宙におけるDTN	9
2.4.2 Bundle Protocol	9
2.4.3 IPN address	9
2.4.4 Convergence Layer と LTP	10
2.4.5 既存のDTN実装	10
第3章 DTNにおけるContact Graph Routingの運用と課題	12
3.1 DTNの運用計画の決定	12
3.2 転送可能な経路の計算	13
3.2.1 初期のCGRにおけるルーティングのアルゴリズム	13
3.2.2 CGR-EF	15
3.2.3 ECGR	15
3.3 最適な経路の決定とBundleの転送	16

3.4	Contact Plan の定期的・継続的な配布	16
3.5	Contact Plan の臨時更新	17
3.6	Contact Plan の臨時更新の課題	17
第 4 章	Contact Plan の臨時更新の天体内への限定的な拡散の提案	19
4.1	要件 1: 臨時更新による配送遅延の低下	19
4.2	要件 2: 臨時更新による運用面での効果	22
第 5 章	提案手法の実装とシミュレーションの環境	23
5.1	Omnet++ と DTNsim を用いた評価環境	23
5.2	2030・2040 年代の DTN を想定したシミュレーション	23
5.2.1	2030 年代の地球・月間の DTN を想定したシミュレーションのシナリオとパラメータ	23
5.2.2	2040 年代の地球・月・火星間を想定したシミュレーションのシナリオとパラメータ	25
5.2.3	シミュレーションで用いる Bundle トラフィック	26
第 6 章	評価手法と結果	27
6.1	本提案の評価概要	27
6.2	要件 1 に対するシミュレーションでの到達率・到達遅延の結果	27
6.2.1	地球・月間のシミュレーション結果と考察	27
6.2.2	地球・火星間のシミュレーション結果と考察	28
6.3	要件 2 に対する更新メッセージによるリンク消費と考察	30
第 7 章	結論と展望	36
7.1	本研究のまとめ	36
7.2	今後の課題と展望	36
	謝辞	38
	付録	42

図 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	6
2.3	世界のロケット打ち上げ数の推移	7
2.4	DTN を搭載したノード間のみでの通信	8
3.1	4つのノードからなる DTN の例	13
3.2	図 3.1 のトポロジーにおける Contact Plan の例 (Contact に関する表記) .	14
3.3	図 3.1 のトポロジーにおける Contact Plan の例 (Range に関する表記) . .	14
3.4	図 3.2 及び図 3.3 の Contact Plan から計算される Contact Graph の例 . . .	15
4.1	本実験で用いるトポロジー	20
4.2	Contact 失敗時に既存手法と提案手法において選択される代替経路の例 . .	20
4.3	Contact 失敗時の配送遅延変化の予想	21
6.1	地球・月間シナリオにおける Bundle の到達率	28
6.2	地球・月間シナリオにおける Bundle の到達遅延	29
6.3	地球・火星間シナリオ (距離 480 光秒) における Bundle の到達率	30
6.4	地球・火星間シナリオ (距離 480 光秒) における Bundle の到達遅延	31
6.5	地球・火星間シナリオ (距離 840 光秒) における Bundle の到達率	32
6.6	地球・火星間シナリオ (距離 840 光秒) における Bundle の到達遅延	33
6.7	地球・火星間シナリオ (距離 1200 光秒) における Bundle の到達率	34
6.8	地球・火星間シナリオ (距離 1200 光秒) における Bundle の到達遅延 . . .	35

表 目 次

2.1	DTN 実装とその機能の比較	11
4.1	本論文で用いる表記と意味の対応関係	19
4.2	既存手法における CPUP の PDU のフォーマット	22
4.3	既存手法における CPUP の Command Block のフォーマット	22
5.1	地球・月間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係	24
5.2	地球・月間シナリオのシナリオにおけるノード間の距離	24
5.3	地球・火星間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係	25
5.4	地球・火星間シナリオのシナリオにおけるノード間の距離	25
5.5	地球・月間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係	26
5.6	地球・火星間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係	26
6.1	既存手法における単一の Contact を削除する CPUP の Command Block . . .	32

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.

1.2 本研究の目的と構成

本研究では Contact Plan の臨時更新を行うことで該当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つつ, かつ Contact Plan の臨時更新の範囲を, リンク障害発生 of 該当惑星内に限定することにより, 天体間のリンク消費を抑えている. 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の中心的なコンセプトである CGR と, その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既存手法と提案手法の差異について説明する. 5 章では, 本論文の提案する手法を評価のため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, その結果を示すとともに, 考察を行う. 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とDTN技術

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[18]。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[14]。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[20]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[25]。加盟国はその後増加し、2024年時点で40カ国である[15]。本章ではこれらの宇宙開発の進展について詳述する。

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[19]。

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

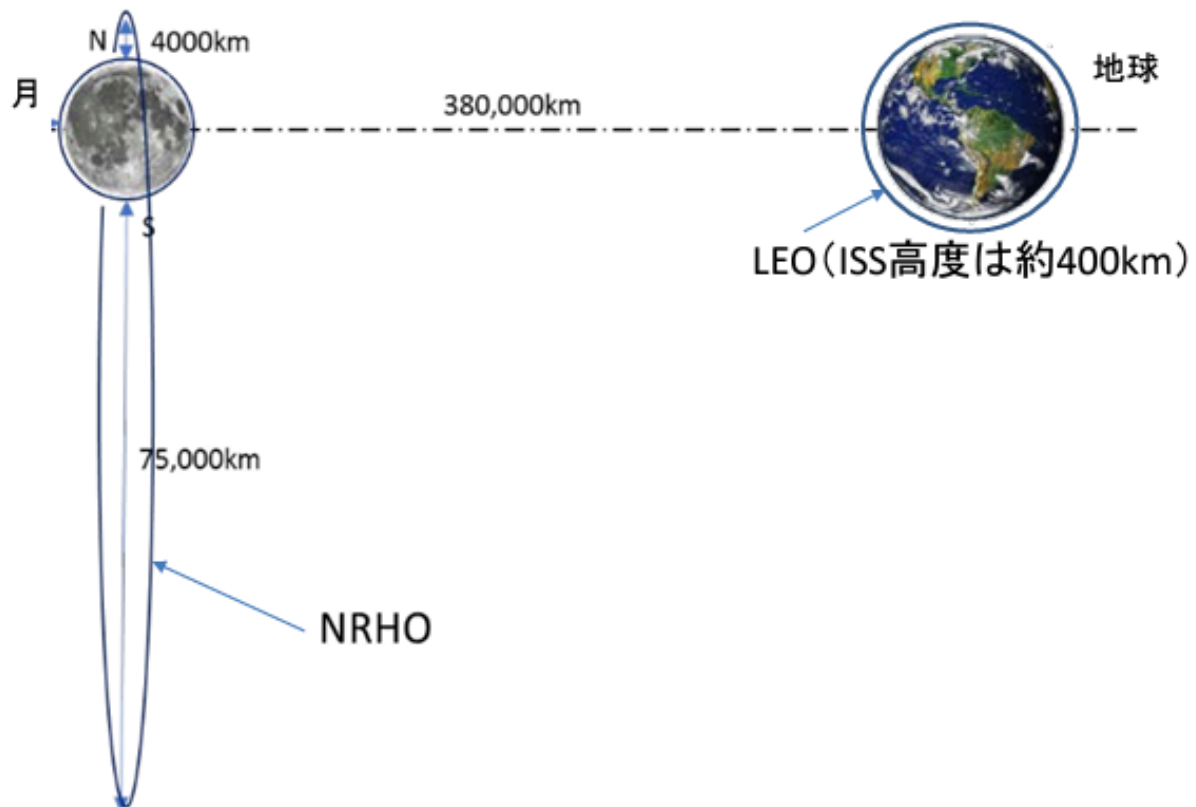


図 2.1: アルテミス計画におけるステーションの投入予定軌道

参考文献 [19]9 ページより引用

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（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。[22]

2.1.2 アルテミス計画以外の月探査計画

International Lunar Research Station (ILRS) は、中国国家航天局 (CNSA) とロシア連邦宇宙局 (ROSCOMOS) が主導する 2024 年 9 月時点で 13 カ国が参加している月面基地プロジェクトであり、月表面/月軌道においてさまざまな研究や技術実証が計画されている [1]。プロジェクトは主に以下の 3 つの段階に分けられている。2021 年～2025 の調査フェーズでは、ILRS の初期段階として月面の詳細な調査が行われ、ILRS の設計と建設候補地の選定、月面での高精度かつ安全な軟着陸を実現するための技術検証などが行われる。

2026 年～2035 年の建設フェーズでは、さらにステージ 1 と 2 に段階を分けて計画が進められる。ステージ 1 では ILRS の指令センターにおける技術検証、月サンプルの回収、大量貨物の輸送と高精度で安全な軟着陸の実現が目指され、ILRS の共同運用が正式に開始される。ステージ 2 では ILRS の包括的な構築が進められ、エネルギー供給、通信、輸送サービスをはじめとする軌道上および月面施設の整備が完了し、ILRS が完成する。2036 年以降の利用フェーズでは、ILRS は科学研究や探査、技術検証のための拠点として活用され、有人月面ミッションの支援や、必要に応じた施設の拡張や保守も行われる予定である。

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 NASA の Perseverance や ESA とロシアの国営宇宙公社ロスコスモス（State Space Corporation: ROSCOSMOS）の ExoMars などが進行中で、サンプルリターンや地震観測、生命探査が行われている。また中国の「天問 1 号」も火星の地質と水の痕跡を調査中である。火星とその衛星であるフォボスとダイモスの探査計画は、火星の地質や生命の痕跡調査、衛星の起源解明、資源利用、そして人類の宇宙活動の基盤構築を目的としている。フォボスに関しては、JAXA の「MMX ミッション」が注目されている。この計画では、フォボスに対しサンプルリターンを行い、衛星の起源を探る予定である。またフォボスは将来的に火星有人探査の中継拠点となる可能性もある。一方ダイモスは火星衛星探査計画（Martian Moons eXploration : MMX）のフライバイ観測でデータが収集され、フォボスとの比較が行われる予定である。

2.1.4 民間事業者の宇宙事業への参画

当初は軍事・政府関係の需要が中心であった宇宙開発は近年特に民間事業者の参画が進んでおり、幅広い用途の宇宙開発が進められている。2022 年時点での世界の宇宙産業規模は 54 兆円、さらに 2040 年までに 140 兆円規模に拡大すると予想されている [23]。また日本国内でも市場規模は約 4 兆円であり、政府は 2030 年代早期の倍増（約 8 兆円）を目指している。打ち上げ事業では米国の SpaceX を筆頭に打ち上げ回数が増加しており、2022 年には米国の民間事業者だけで世界全体の打ち上げ回数の約 42% を占めた。2.3. SpaceX の独占的な状態が続いてはいるものの、各国の事業者も開発を続けている。

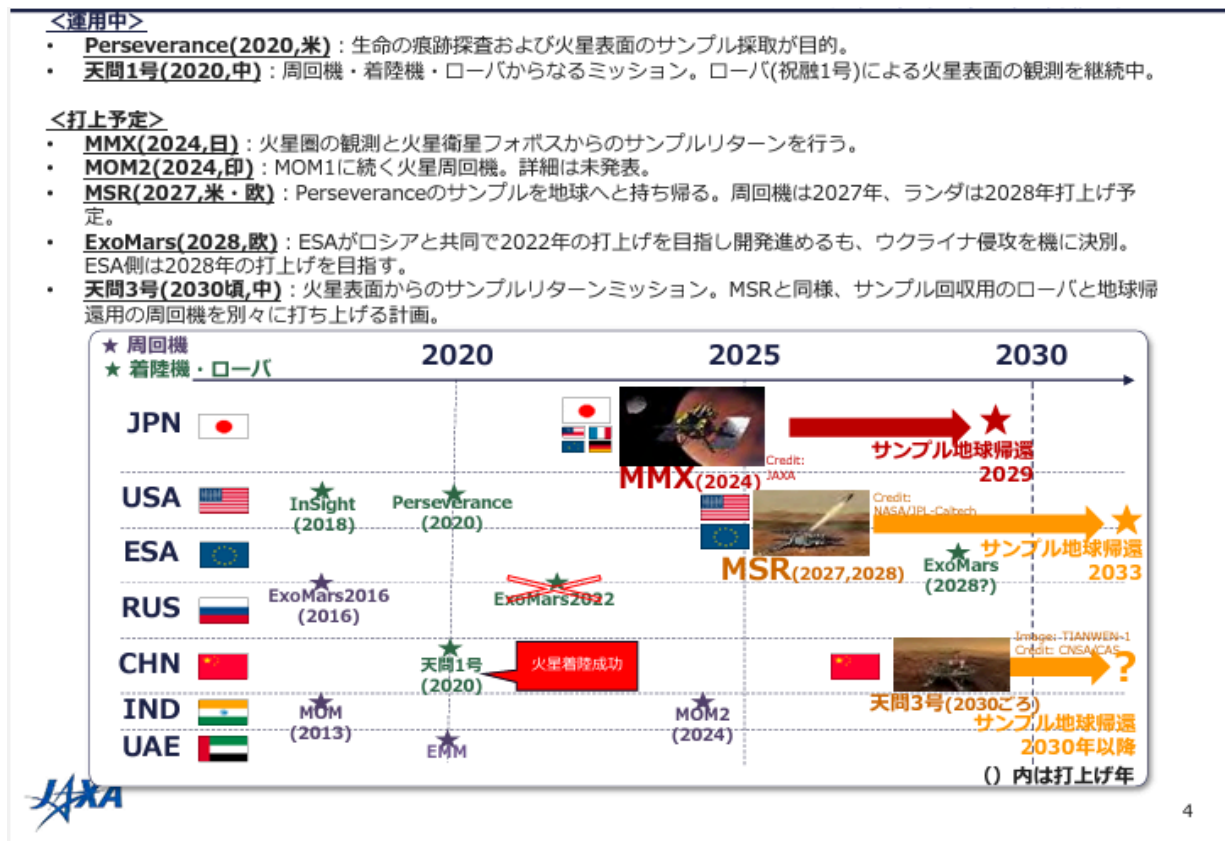


図 2.2: 各国の火星探査計画

参考文献 [24]4 ページより引用

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。

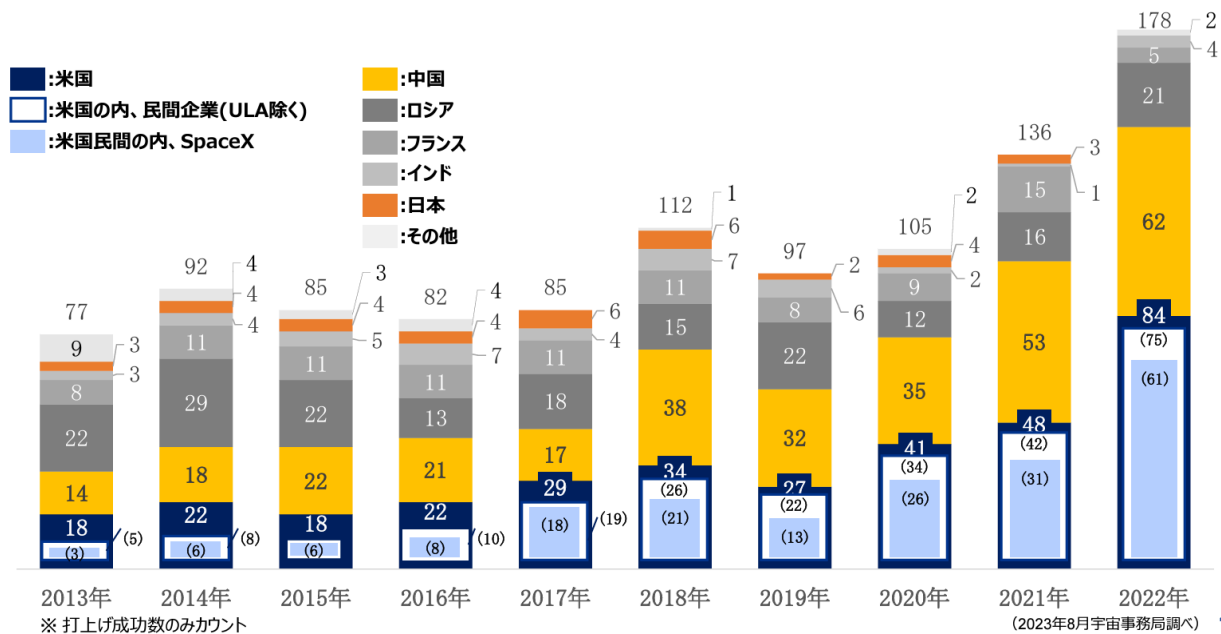


図 2.3: 世界のロケット打ち上げ数の推移

参考文献 [21]10 ページより引用

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。[13] 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[7] 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 Bundle 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 Bundle 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。[12]

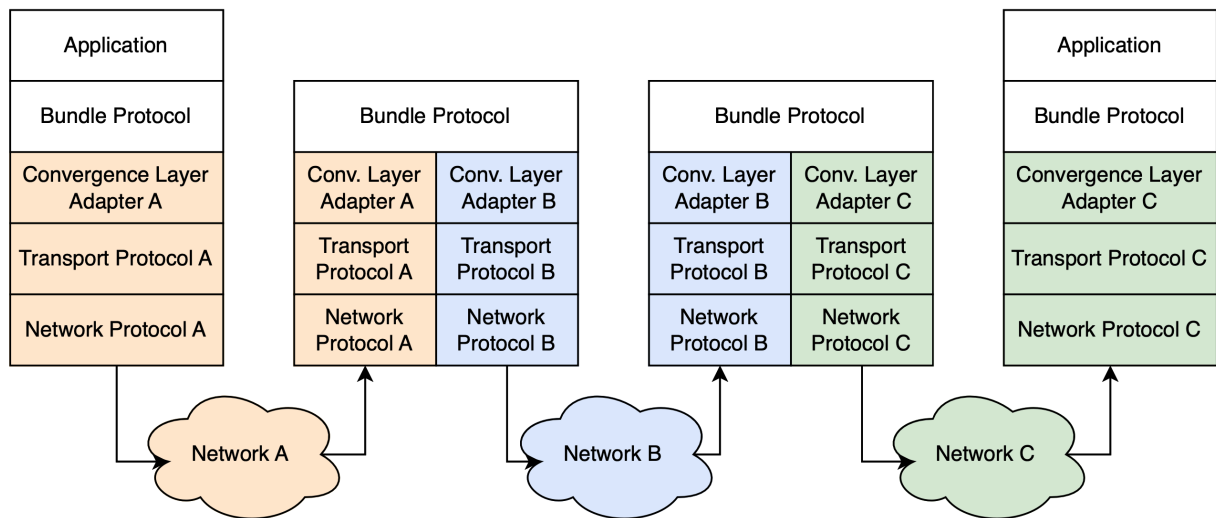


図 2.4: DTN を搭載したノード間のみでの通信

参考文献 [12] Figure 1 より引用。図中の Convergence Layer (CL) については 2.4.4 で説明する。

2.4.1 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[17] 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 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。

2.4.2 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 Bundle 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 Bundle 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。

2.4.3 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。

2.4.4 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 2.4 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[4] 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.

2.4.5 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 Bundle へのエンコード・デコード, 中間ノードでの Bundle 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	uD3TN	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 [3]figure1 より引用

第3章 DTNにおける Contact Graph Routingの運用と課題

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) [9] 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 [8] として標準化されている。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 3.1 節で述べる運用計画の決定、3.2 節で述べる経路計算、3.3 節で述べる実際の Bundle の転送の3つの段階に大別できる。本章ではそれぞれの段階ごとに 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。さらに実際の運用においてはこの3段階を継続的に実施する必要があり、そのために必要な Contact Plan の更新について 3.4 節と 3.5 節で述べる。

3.1 DTN の運用計画の決定

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、図 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)). ただし宇宙における特定の 2 ノード間の通信機会是非対称であるため, 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.

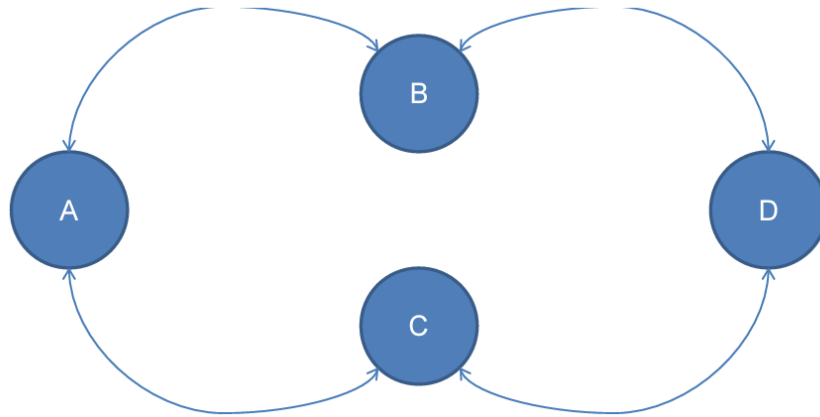


図 3.1: 4 つのノードからなる DTN の例

参考文献 [8]figure3-1 より引用

3.2 転送可能な経路の計算

3.1 節で決定された Contact Plan は, 衛星どうしの Contact を記載したものであり, 実際の DTN の運用においては Contact Plan に基づいて転送可能な経路を計算する必要がある. ノード A からノード D に向けた Bundle を配送する場合, 図 3.2 及び図 3.3 からなる Contact Plan に対し, 3.2.1 項で述べるアルゴリズムを用いることにより図 3.4 のような Contact Graph を得る. ただし Contact Graph における頂点は DTN における各ノードではなく単一の Contact であるため, Contact Graph は DTN のトポロジーを示すものではなく, データ転送が可能な経路を計算するためのグラフである.

3.2.1 初期の CGR におけるルーティングのアルゴリズム

CGR では図 3.4 に対してアルゴリズムによる計算を行うことで最適な転送経路を決定している. CGR は [5] において, 基本的なパラメータと Contact Graph の利用や, これら

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: 図 3.1 のトポロジーにおける Contact Plan の例 (Contact に関する表記)
 参考文献 [8]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: 図 3.1 のトポロジーにおける Contact Plan の例 (Range に関する表記)

参考文献 [8]figure3-3 より引用.

を用いた転送先の近接ノードの決定などの基本的な概念が提案された. しかしこの提案ではルーティングアルゴリズムについては, 静的な経路計算に関するアルゴリズムは規定されず, ルーティングループ防止の必要性, デフォルトルートを用いた動的ルーティングの想定などに触れられるのみにとどまった.

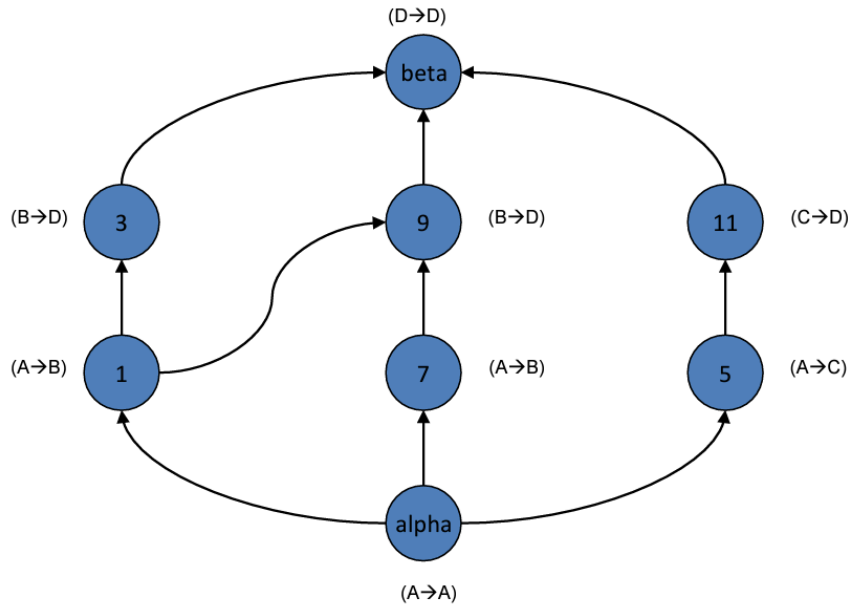


図 3.4: 図 3.2 及び図 3.3 の Contact Plan から計算される Contact Graph の例

参考文献 [8]figure3-4 より引用.

3.2.2 CGR-EF

Burleigh は 2010 年に [6] において, earliest forfeit time, すなわちエンドツーエンドの転送が可能なパスにおける, そのパスの最短失効時間に注目し, その時間が短いパスから優先して利用することで, リンク利用の効率化を図る CGR-EF を提案した. CGR-EF は 2009 年 10 月から 11 月にかけて行われたディープインパクトネットワーク実験 (DINET) [11] に用いられ, NASA のジェット推進研究所と宇宙船の間の約 300 枚の画像転送に成功した.

3.2.3 ECGR

その後 Segui らは, earliest-forfeit-time ではなく earliest-arrival-time, すなわちエンドツーエンドの最短到達遅延を指標とする ECGR を提案した [16]. ECGR は earliest-arrival-time を指標とすることでより計算コストの小さいダイクストラアルゴリズムを用いた経路計算を可能にしており, またルーティングループが発生しない, 経路が時間とともに単調に収束することもメリットである. これ以後, CGR におけるアルゴリズムとしては基本的にダイクストラが用いられている.

3.3 最適な経路の決定と Bundle の転送

3.2 節で転送が可能な経路が計算されると、これらの計算された経路から最適と考えられる経路が決定され実際に Bundle が転送される。転送可能な経路が複数存在する場合、[8] では最適な経路の決定には以下の 3 点が検証される。

- Earliest transmission opportunity (ETO)
- Effective volume limit
- Projected arrival time

Earliest transmission opportunity (ETO) は、転送したい Bundle (B-object) がネクストホップとなる隣接ノード (N-next) に転送される最初の時間である。現在この転送したい Bundle が保持されているノード (N-current) において、B-other が既にキューイングに入っており、B-X と比較して優先的に転送が行われる場合、B-other が N-current に存在しない場合と比較して B-object の *Earliesttransmissionopportunity* (ETO) は遅くなる。候補となる経路によって、B-object の ETO は異なるため、最適な経路の決定の際には考慮される。

Projected arrival time (PAT) は、B-object の宛先ノード (N-dest) に B-object が到着すると予想される時間であり、B-object の *Time-to-live* (TTL) がこれよりも小さい場合、B-object は破棄される。B-object の *Time-to-live* (TTL) がこれよりも大きい場合、転送可能な経路のうち最も PAT が小さい経路が最適な経路として決定される。

Effective volume limit (EVL) は選定された経路において、転送が可能な Bundle のサイズの最大値を示す値であり、この値が B-object の値よりも小さい場合、B-object はフラグメンテーションされる。

3.4 Contact Plan の定期的・継続的な配布

上記 3.1 節, 3.2 節, 3.3 節を順に実施することで DTN における CGR が運用されることが想定され、これらの手法についての研究がなされている。しかし実際の運用において DTN の各ノードで経路の計算、決定を行うには、さらに 3.1 節で決定された Contact Plan を、マスターノードから DTN の各ノードに配布する必要がある。さらに配布する Contact Plan は有限時間の Contact しか記述しておらず、運用時は 1 度配布するだけでなく定期的・継続的な配布が必要となる。Fraire らはノードが保持する DTN のノードの数の増加に対し

て Contact Plan のサイズが指数関数的に増加することを指摘し、そのサイズを減少させる手法の研究を行なった [10]. しかしどのようなサイズの Contact Plan であっても更新は必要であるが、現在その手法に関する標準化はなされていない.

3.5 Contact Plan の臨時更新

3.1 節の通り, Contact Plan は運用計画の策定時に決定される. しかし実際の DTN の運用においては, Contact Plan で予定された計画とは異なる場合が存在する. Bezirgiannidis らは, 予定外の事象により Contact が失敗する可能性について指摘し, その情報を他のノードに拡散し Contact Plan をアップデートすることを提案し, Contact Plan Update Protocol (CPUP) を実装した [2]. CPUP を実装したケースにおいては, そうではないケースと比較して DTN の各ノードが最新のトポロジーを認識できるため, Bundle をより正しい経路によって配送することが可能になり, 配送遅延が CPUP が実装されていないケースよりも低下した. これにより, 想定されていた Contact に失敗した場合に, その情報を DTN の他のノードに拡散し Contact Plan を更新することで配送遅延を低下させることが可能であることが示された. 以後, 本論文ではこの情報拡散と Contact Plan の更新を Contact Plan の臨時更新と呼ぶ.

3.6 Contact Plan の臨時更新の課題

3.5 節で述べたように, Contact Plan の臨時更新は配送遅延の増加を防ぎネットワークとしての品質を向上することに寄与する. しかし実際に Contact が失敗した場合, 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 Bundle 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 節で述べた天体間の大きな遅延と, 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. Bezirgiannidis らの研究で行われた CPUP の実装でも, DTN の全てのノードに対して臨時更新を行うことを前提としているが, 情報が天体間遅延を超えて拡散した時点で, 既に当該 Contact は古くて使われない経路になっている場合も存在するため, 運用する DTN の Contact Plan によっても, 全てのノードか天体内のノードのみかなど臨時更新の対象の対象を選定する必要がある. また Contact の障害情報を拡散することは, その通知のために貴重な天体間のリンクに余計な Bundle が発生する. またその情報を受け取ったノードでの再計算を伴い, さらにトラフィックが一

部のノードに集中することにもなり得るため, DTN の運用におけるこれらの影響についても考慮する必要がある. そのため *Contact Plan* の臨時更新の対象は, そのノードに拡散することによる配送遅延の低下度合いと運用面における影響に応じて対象を工夫する必要性が存在する.

第4章 Contact Planの臨時更新の天体内への限定的な拡散の提案

3.6節で述べたとおり, Contact Planの臨時更新には配送遅延の低下度合いと拡散による運用面における影響によって対象を選定することが必要である. Bezirgiannidisらの提案した全てのノードにおいて臨時更新を行う既存手法に対して, 本論文ではこの課題に対して, Contactの失敗が起きた際に, その通知を行い Contact Planを更新するノードを天体内のノードにのみ拡散し, 他天体のノードには拡散しない手法を提案する. 本章ではこの提案が満たすべき要件について整理し, それらに対する既存手法と提案手法の定性的な特性について述べる. また本論文では以降, 経路や遅延について次のような表記を用いる.

本論文での表記	意味
$R_{X \rightarrow Y \rightarrow Z}$	ノード $X \rightarrow$ ノード $Y \rightarrow$ ノード Z の順の経路
D_Y^X	ノード X からノード Y へのエンドツーエンドの遅延

表 4.1: 本論文で用いる表記と意味の対応関係

4.1 要件 1: 臨時更新による配送遅延の低下

3.5で述べたように, Contact Planの臨時更新の目的は, 想定された Contact に失敗した場合にその情報を DTNの他のノードに拡散し Contact Planを更新することで, DTNの各ノードが最新のトポロジーを認識し配送遅延の増加を抑えることである. 既存手法と提案手法の効果について図 4.1 のトポロジーを用いて考える.

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. このトポロジーにおいて, 図 4.2 のように今ベストパスが $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6}$ (経路 1) であるとし, 仮にノード 4 から 6 の Contact が何らかの理由で失敗した場合に, ベストパスは $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6}$ の経路 (経路 2) となり, ただしこれよりは最適

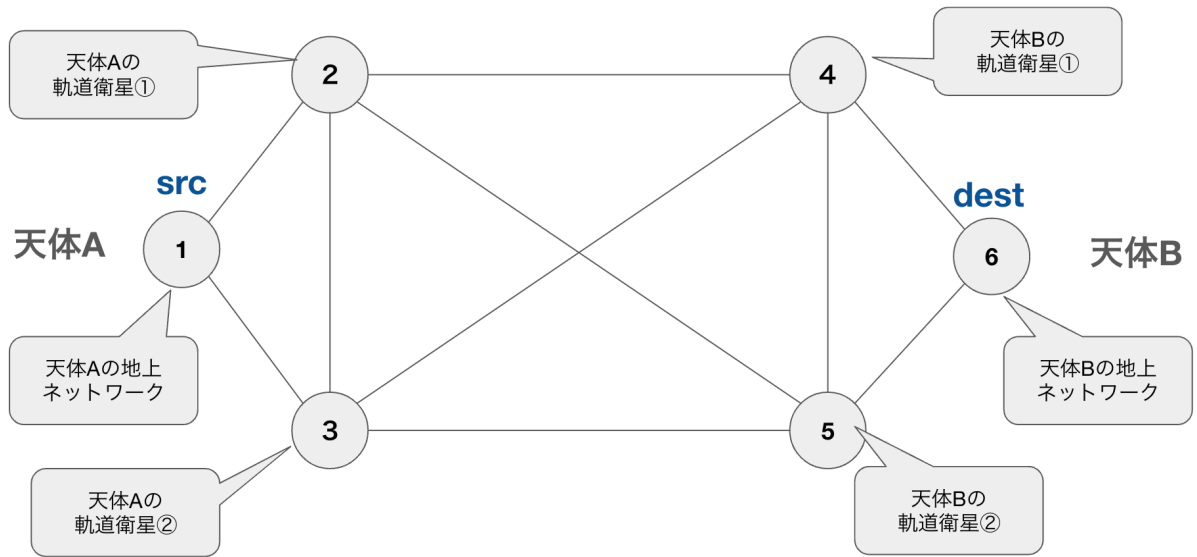


図 4.1: 本実験で用いるトポロジー

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。

経路ではないものの $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6}$ (の経路 (経路 3) でも *Bundle* の配送が可能であるとする。

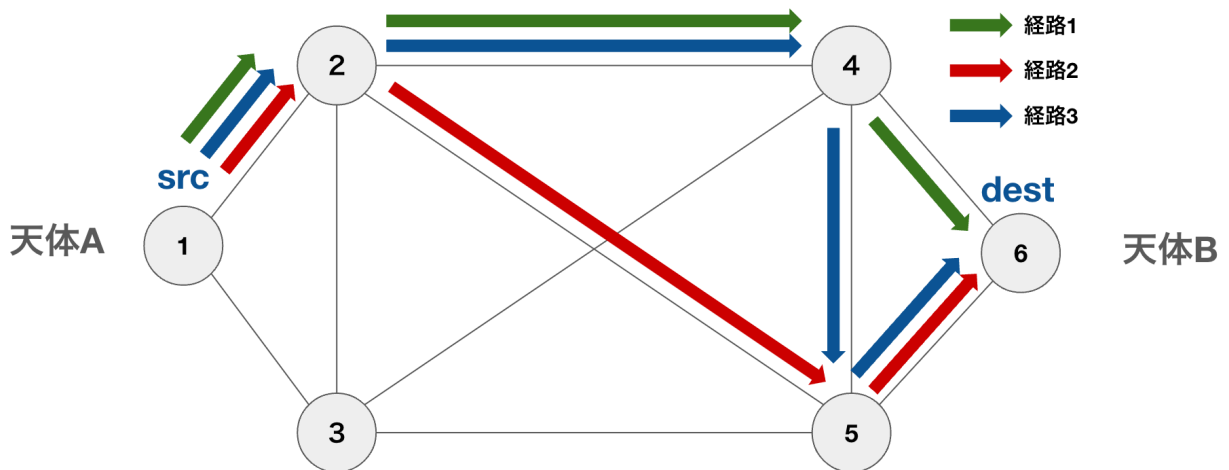


図 4.2: Contact 失敗時に既存手法と提案手法において選択される代替経路の例

既存手法も提案手法も用いず更新を行わない場合, どのノードもその Contact の失敗を知らないためすべてのノードはベストパスが経路 1 のままと認識し, ノード 4 においてノー

ド 6 への Bundle の配送を試み続ける。TTL の期限切れまでそれを試み続けるため、図 4.3 中の黒線のように、障害発生中は Bundle が到着せず、その Contact の復旧が起きた場合、もしくは最適経路が当該 Contact を使用しない経路に切り替わった時に Bundle の送信が成功するようになる。

既存手法では、その情報をノード 4 を起点に発信し、その情報を受け取ったノードは順次 Contact Plan から当該 Contact を削除し、Contact Plan を更新する。これにより、失敗発生直後よりノード 4 は代替経路となる経路 3 を利用することが可能になり、経路 1 と比較して到達遅延は増加するものの、Bundle の送信には成功する。さらにこの場合、天体間遅延を超えてこの情報が天体 A のノード 1・2・3 に配信されると、ノード 2 は経路 2 が最適経路と認識することができるようになり、経路 3 よりも配送遅延を低下させることができる。そのため既存手法における障害発生時の到達遅延の推移は図 4.3 中の紫線のようになる。

提案手法では、当初は既存手法同様経路 3 をすぐに利用できるようになるが、天体間には更新情報を伝搬しないため経路 2 が利用されることはなく、そのため提案手法における障害発生時の到達遅延の推移は図 4.3 中の黄線のようになる。

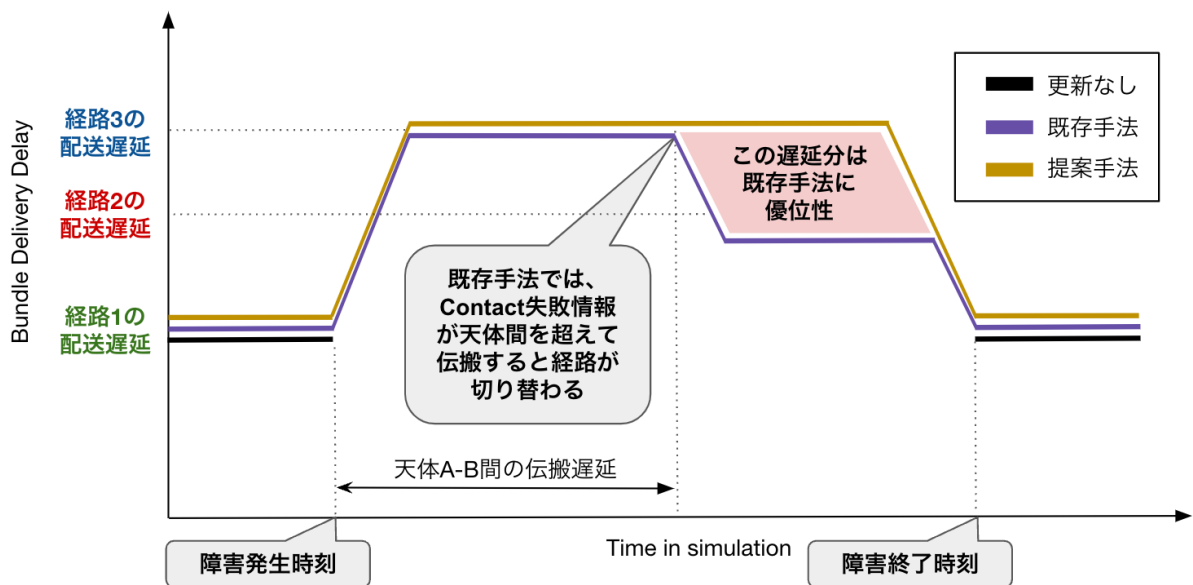


図 4.3: Contact 失敗時の配送遅延変化の予想

既存手法と提案手法の差はすなわち経路 2 と経路 3 の遅延の差（図 4.3 中の赤い部分）である。しかしこれはノード 2 からノード 4 の遅延とノード 2 からノード 5 の遅延の差、すなわち天体 B の 2 つの衛星の天体 A の衛星との距離の差によるものである。これは経路

全体の長さに比べると比較的短いものであると考えられ、既存手法で途中から経路 2 を利用できることの利点は限定的である。そのため、配送遅延の低下という点に置いて当然提案手法の有効性はあるものの、提案手法も既存手法に近い有効性があると予想される。

4.2 要件 2: 臨時更新による運用面での効果

4.1 で述べたように、*Contact Plan* の臨時更新をもし天体間においても行う場合、貴重な天体間のリンクを消費することになる。提案手法はこの点において、既存手法と違い自天体内のノードにのみ拡散するため、この消費を行わない。既存手法の CPUP における更新メッセージの Protocol Data Unit (PDU) は表 4.2 のようになっており、この PDU 内で示される Command Block のフォーマットは表 4.3 のようになっている。この PDU を用いて全てのノードに対して臨時更新を行う場合、そのサイズ分天体間のリンクを消費する。

表 4.2: 既存手法における CPUP の PDU のフォーマット

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3
Version num.	Number of Command Blocks (SDNV)		
Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
1 st Command Block			
...			
Byte $4 \times n$	Byte $4 \times n + 1$	Byte $4 \times n + 2$	Byte $4 \times n + 3$
n^{th} Command Block			

参考文献 [2]Table1 より引用。

表 4.3: 既存手法における CPUP の Command Block のフォーマット

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3
Creation Timestamp (SDNV)		Command Expiry (SDNV)	
Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
Command Originator (SDNV)		Command Type	
Byte 8	Byte 9	...	Byte n
Command Parameter 1 (SDNV)		...	Comm. Param. k (SDNV)

参考文献 [2]Table2 より引用。

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。

5.2 2030・2040年代のDTNを想定したシミュレーション

本実験においては、2030年代に地球・月間、2040年代に地球・月・火星間にまたがる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4.1と同様のトポロジーを想定する。

5.2.1項では2030年代の地球・月間のDTNにおけるシナリオ、5.2.2項では2040年代の地球・月・火星間のDTNにおけるシナリオを説明する。

5.2.1 2030年代の地球・月間のDTNを想定したシミュレーションのシナリオとパラメータ

2030年代の人類の月における活動区域は当面月の南極域になることが予想され、図2.1に示すように、月南極域との通信可能時間の長いNRHO軌道の利用が検討されている。本

実験ではこの NRHO 軌道を利用した地球・月間の DTN ネットワークを想定し、図 4.1 のトポロジーにおいて、それぞれ以下の構成を用いる。

図 4.1 での表示	本シナリオにおける対応
天体 A	地球
天体 B	月
ノード 1	地球の地上 DTN ノード
ノード 2	地球の静止軌道上に存在する DTN ノード
ノード 3	地球の静止軌道上に存在する DTN ノード
ノード 4	月の NRHO 軌道上に存在する DTN ノード
ノード 5	月の NRHO 軌道上に存在する DTN ノード
ノード 6	月の地表 DTN ノード

表 5.1: 地球・月間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係

地球の静止軌道上に存在する DTN ノードは地球に対してほぼ円軌道を描き、地表からおよそ 36,000km（およそ 0.12 光秒）の高度を飛行する。また月の NRHO 軌道上に存在する DTN ノードは、月面から 4,000km~75,000km 程度を極端な楕円軌道を描いて飛行する。この時地球の静止軌道上に存在する DTN ノードと月の NRHO 軌道上に存在する DTN ノードの距離は 308,000km（およそ 1.03 光秒）~415,000km 程度（およそ 1.38 光秒）になる。これらを考慮し、ノード間の距離は以下のように設定した。

図 4.1 でのノードペア	Contact Plan に表記する距離
ノード 1 - ノード 2 または ノード 3 間	0.12 光秒
ノード 2 - ノード 3 間	0.12 光秒
ノード 2 または ノード 3 - ノード 4 または ノード 5 間	1.03 光秒 ~ 1.38 光秒
ノード 4 - ノード 5 間	0.13 光秒
ノード 4 または ノード 5 - ノード 6 間	0.13 光秒

表 5.2: 地球・月間シナリオのシナリオにおけるノード間の距離

5.2.2 2040 年代の地球・月・火星間を想定したシミュレーションのシナリオとパラメータ

2040 年代には活動区域は火星にまで広がっていることが予想される．本実験では??項で述べた地球・月間の DTN ネットワークと同様, 以下の構成を用いる．

図 4.1 での表示	本シナリオにおける対応
天体 A	地球
天体 B	月
ノード 1	地球の地上 DTN ノード
ノード 2	地球の静止軌道上に存在する DTN ノード
ノード 3	地球の静止軌道上に存在する DTN ノード
ノード 4	火星の軌道上に存在する DTN ノード
ノード 5	火星の軌道上に存在する DTN ノード
ノード 6	火星の地表 DTN ノード

表 5.3: 地球・火星間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係

火星における運用は現時点では未定ではあるものの, 火星の開発初期においてはおよそ月における運用と同様のものになると考えられる．そのためノード間の距離は以下のように設定した．ただし「ノード 2 または ノード 3 - ノード 4 または ノード 5 間」すなわち地球軌道と火星軌道との距離については, 約 480 光秒～1200 光秒と大きな変動が存在するものの, これらの変動周期が非常に長いため, 480 秒, 840 秒, 1200 秒の 3 つの値を用いてそれぞれ別にシミュレーションを行った．

図 4.1 でのノードペア	Contact Plan に表記する距離
ノード 1 - ノード 2 または ノード 3 間	0.12 光秒
ノード 2 - ノード 3 間	0.12 光秒
ノード 2 または ノード 3 - ノード 4 または ノード 5 間	480 秒, 840 秒, 1200 秒
ノード 4 - ノード 5 間	0.13 光秒
ノード 4 または ノード 5 - ノード 6 間	0.13 光秒

表 5.4: 地球・火星間シナリオのシナリオにおけるノード間の距離

5.2.3 シミュレーションで用いる Bundle トラフィック

本実験では図 4.1 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。DTNsim ではトラフィックとして生成する Bundle について様々なパラメータを設定することが可能である。本論文におけるシミュレーションではそれぞれ表 5.5 と表 5.6 の値を用いた。また実際の宇宙インターネットにおけるトラフィックの発生状況は当然時刻変動するものであるが、本論文におけるシミュレーションでは単位時間あたりのトラフィック量は概ね一定であると仮定した。

図 4.1 での表示	パラメータ名	値
シミュレーション全体における Bundle の総生成数	bundlesNumber	1800
生成した Bundle の送信元ノードの endpoint ID	sourceEid	1
生成した Bundle の宛先ノードの endpoint ID	destinationEid	6
Bundle 生成イベントごとの Bundle のサイズ (bytes)	size	1500
Bundle 生成イベントの間隔 (秒)	interval	1

表 5.5: 地球・月間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係

図 4.1 での表示	パラメータ名	値
シミュレーション全体における Bundle の総生成数	bundlesNumber	8000
生成した Bundle の送信元ノードの endpoint ID	sourceEid	1
生成した Bundle の宛先ノードの endpoint ID	destinationEid	6
Bundle 生成イベントごとの Bundle のサイズ (bytes)	size	1500
Bundle 生成イベントの間隔 (秒)	interval	10

表 5.6: 地球・火星間シナリオのトポロジーと図 4.1 での表示の対応関係

第6章 評価手法と結果

6.1 本提案の評価概要

本章では5章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節では4.1で述べた配送遅延の増加防止の効果について、5.2.1節で述べた地球-月間のシミュレーション、5.2.2節で述べた地球-火星間の距離に応じた3種類のシミュレーションにおける配送を試みた Bundle の到達率とその平均遅延を示す。

6.3節では4.2で述べた運用面での効果について、上記それぞれのシミュレーションについて、運用上のデメリットとして天体間で CPUP コマンドがどれだけリンク消費をするかを示す。

6.2 要件1に対するシミュレーションでの到達率・到達遅延の結果

本章では、要件1に対するシミュレーション結果について述べる。

6.2.1 地球・月間のシミュレーション結果と考察

5.2.1節で述べた地球-月間のシミュレーションについて、配送を試みた Bundle の到達率とその遅延はそれぞれ図6.1と図6.2のようになった。

実験の結果、図6.1に示す通り提案手法では既存手法と同様すべての Bundle が到達した。また到達遅延に関しても、図6.2に示す通り、既存手法とほぼ変わらない数値が出ており、提案手法による遅延増加の防止効果は非常に高かった。また更新を行わない場合において到達遅延が低く計算されているのは、Contact の失敗に伴い到達できなかった Bundle は到達遅延に含めないためである。既存手法と提案手法ではこれらの Bundle は別なルートでルーティングされ、到達遅延は増加するものの、宛先ノードに到達には成功している。

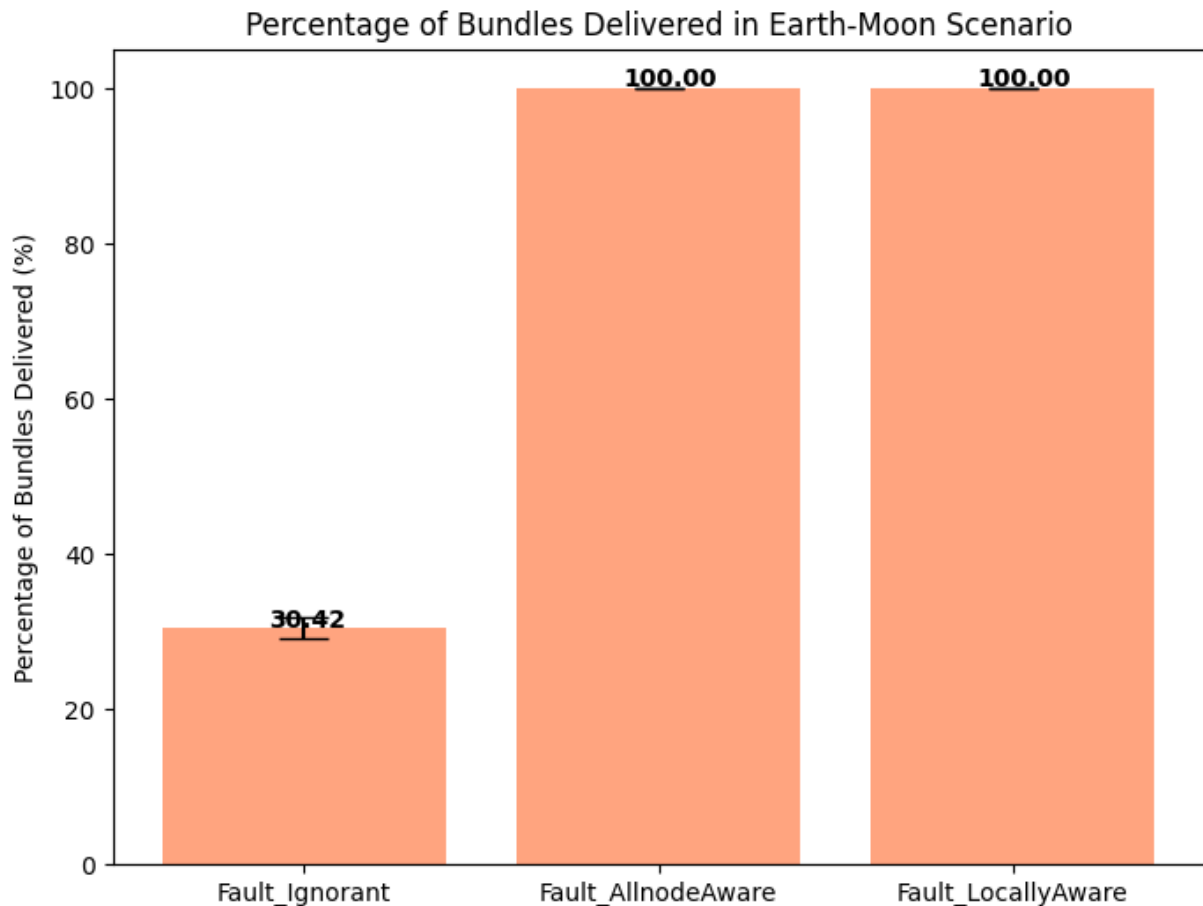


図 6.1: 地球・月間シナリオにおける Bundle の到達率

Contact の失敗情報について、どのノードにも拡散を行わない場合を FaultIgnorant、天体間を超えてすべてのノードに拡散する場合を FaultAllnodeAware、天体内のノードのみに拡散する場合を FaultLocallyAware として表記した。

6.2.2 地球・火星間のシミュレーション結果と考察

5.2.2 節で述べた地球-火星間のシミュレーションについて、配送を試みた Bundle の到達率とその遅延は地球-火星間の距離が 480 光秒の時について図 6.3 と図 6.4 のように、地球-火星間の距離が 840 光秒の時について図 6.5 と図 6.6 のように、地球-火星間の距離が 1200 光秒の時について図 6.7 と図 6.8 のようになった。

実験の結果、図 6.1 に示す通り提案手法では既存手法と同様すべての Bundle が到達した。また到達遅延に関しても、図 6.2 に示す通り、既存手法と完全に一致し、提案手法による遅延増加の防止効果は非常に高かった。火星までのシミュレーションにおいて遅延が既存手法と提案手法で完全に一致している理由としては、地球-火星間の距離が遠いため、Contact 失敗の発生後に選ばれる最適経路に、それ以前までの最適経路と比較して天

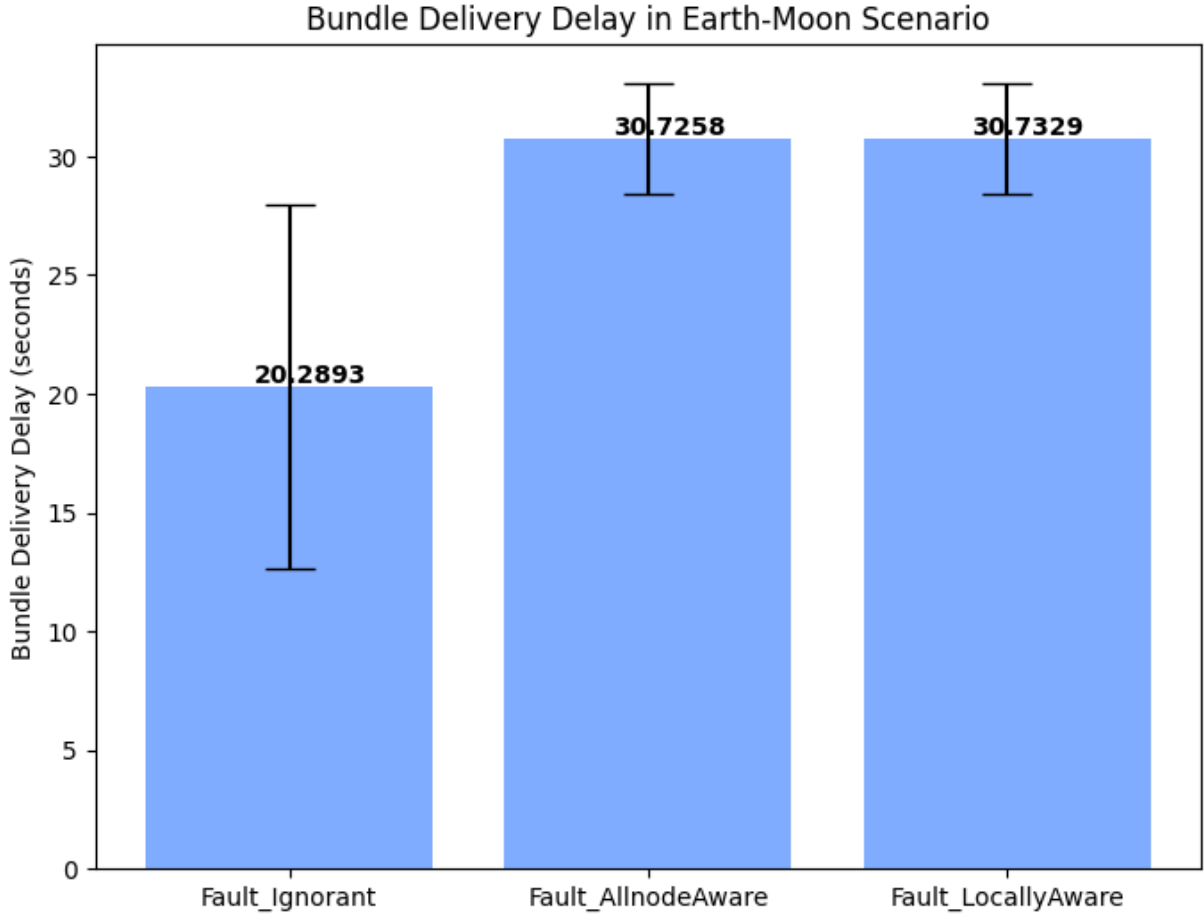


図 6.2: 地球・月間シナリオにおける Bundle の到達遅延

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

体間の経路まで変更する経路が選ばれにくかったことが考えられる。図 4.2 における例で考えると、ノード 4 から 6 への Contact に失敗が生じ、経路 1・ $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6}$ に代わりに選ばれる最適な経路の候補として経路 2・ $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6}$ もしくは経路 3・ $R_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6}$ が同時に存在する場合、 $(A) = D_4^2 + D_5^4 - D_5^2$ が正であれば経路 2 が、負であれば経路 3 が最適経路として選ばれる。しかし $(D_4^2$ と $D_5^2)$ は地球－火星間が 480 光秒の時で D_5^4 のおおよそ 3700 倍程度, 地球－火星間が 840 光秒の時で D_5^4 のおおよそ 6500 倍程度, 地球－火星間が 1200 光秒の時で D_5^4 のおおよそ 9200 倍程度あり, またそれぞれのシミュレーションにおける, D_4^2 と D_5^2 のそのシミュレーションにおける地球－火星間の距離の変動は 1%の範囲であるため, $|D_4^2 - D_5^2| \gg |D_5^4| \cdots (B)$ となりやすい。さらに Contact の失敗発生前には経路 1 が最適経路であった場合には, 前提として経路 1 が経路 2 よりも優先されていた, すなわち $(D_4^2 + D_6^4 - D_5^2 - D_6^5)$ が負であり, 上記同様に $D_4^2 - D_5^2 \gg D_6^4 - D_6^5$ を考慮する

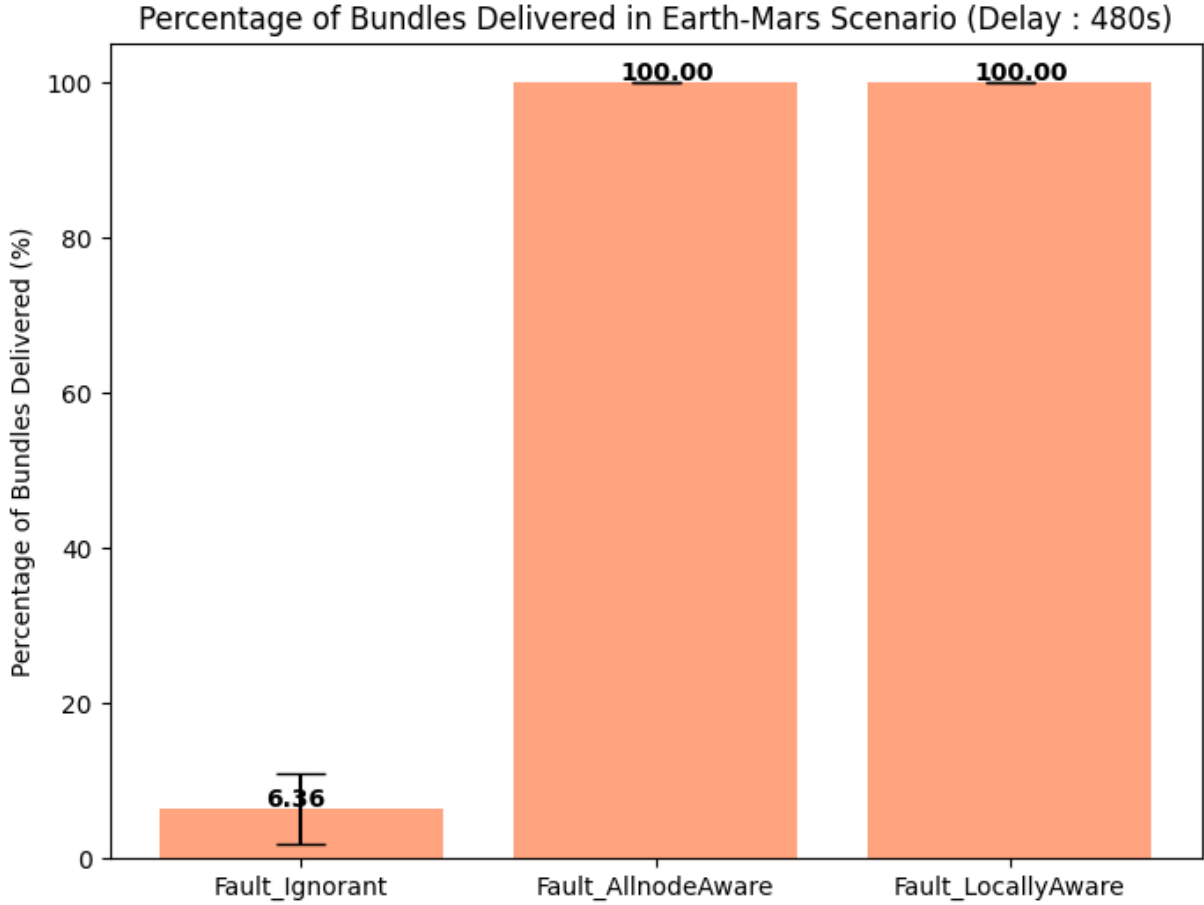


図 6.3: 地球・火星間シナリオ（距離 480 光秒）における Bundle の到達率

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

と $D_4^2 > D_5^2 \cdots (C)$ となる．よって実際に (B) と (C) となっている場合，

$$(A) = D_4^2 + D_5^4 - D_5^2$$

$$\doteq D_4^2 - D_5^2 (\because (B))$$

$$> 0 (\because (C))$$

となり，経路 2 が選択される．これにより既存手法と提案手法において同様の経路が選択され到達率と到達遅延の結果が一致していると考えられる．

6.3 要件 2 に対する更新メッセージによるリンク消費と考察

4.2 で述べたように，既存手法では天体間での更新メッセージの送信が必要であり，その際にリンクを消費する．一方，本提案手法では自天体内のノードにのみ更新メッセージを送信するため，そのメッセージによる天体間リンクの消費は一切ない．本論文では表 4.2

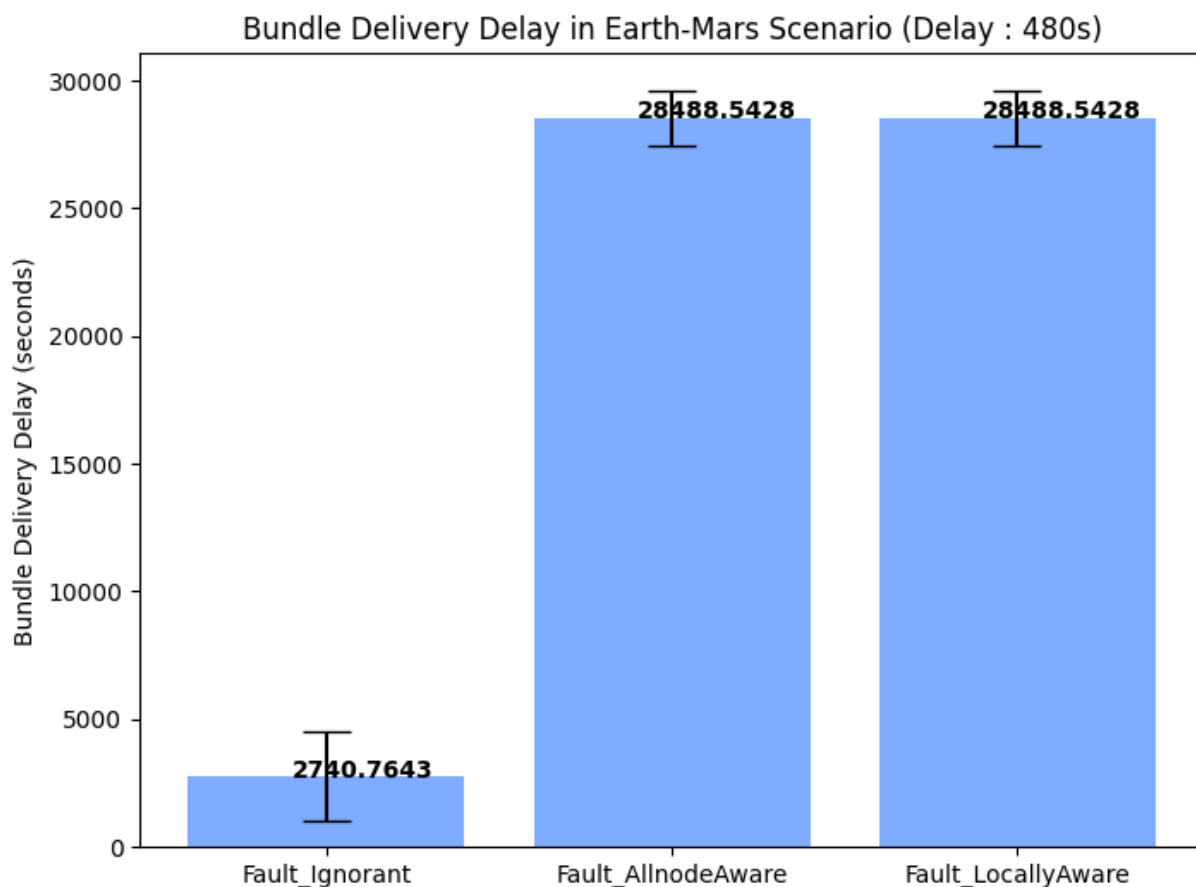


図 6.4: 地球・火星間シナリオ（距離 480 光秒）における Bundle の到達遅延

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

および表 4.3 で示した CPUP の PDU とその中の Command Block については先行研究で用いられたフォーマットをそのまま用いることを想定する。1 回の Contact 失敗とそれを知らせる更新のメッセージが単一の Bundle で送信される場合、CPUP の PDU は以下のようになることが想定される。

リンク消費量は以下ようになる。

$$\text{リンク消費量} = \text{CPUP の PDU のサイズ} \times \text{削除する Contact 数} \quad (6.1)$$

5.2.1 節で述べた地球-月間のシナリオにおいては、生成した 600 回の Contact のうち 200 回の Contact を失敗させるシナリオであるため、リンク消費量は以下ようになる。

$$\text{リンク消費量} = 16\text{Bytes} \times 200 \text{ 個の Contact 削除メッセージ} = 3200\text{Bytes} \quad (6.2)$$

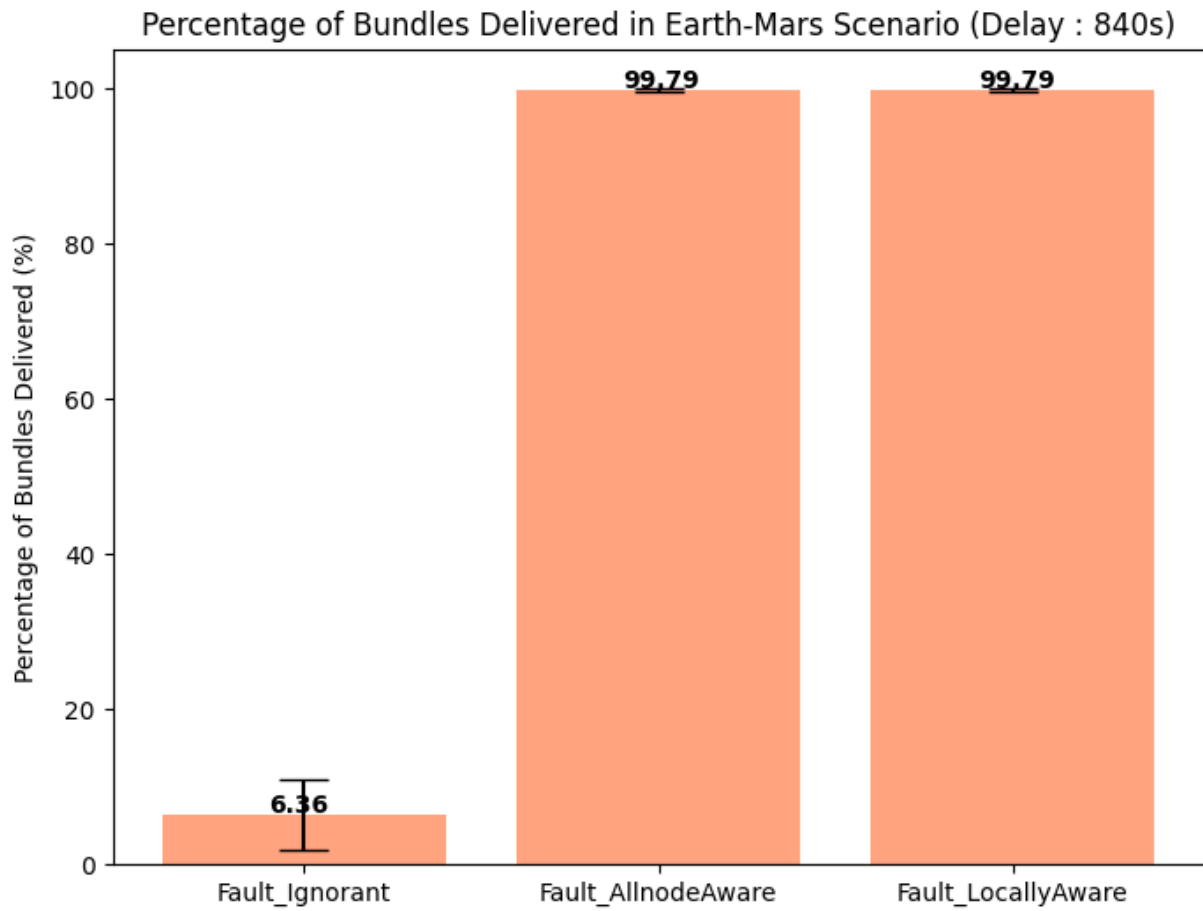


図 6.5: 地球・火星間シナリオ（距離 840 光秒）における Bundle の到達率

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3
Version num.	Number of Command Blocks (SDNV)		
Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
Creation Timestamp (SDNV)		Command Expiry (SDNV)	
Byte 8	Byte 9	Byte 10	Byte 11
Command Originator (SDNV)			Command Type
Byte 12	Byte 13	Byte 14	Byte 15
ID of Contact to delete			

表 6.1: 既存手法における単一の Contact を削除する CPUP の Command Block

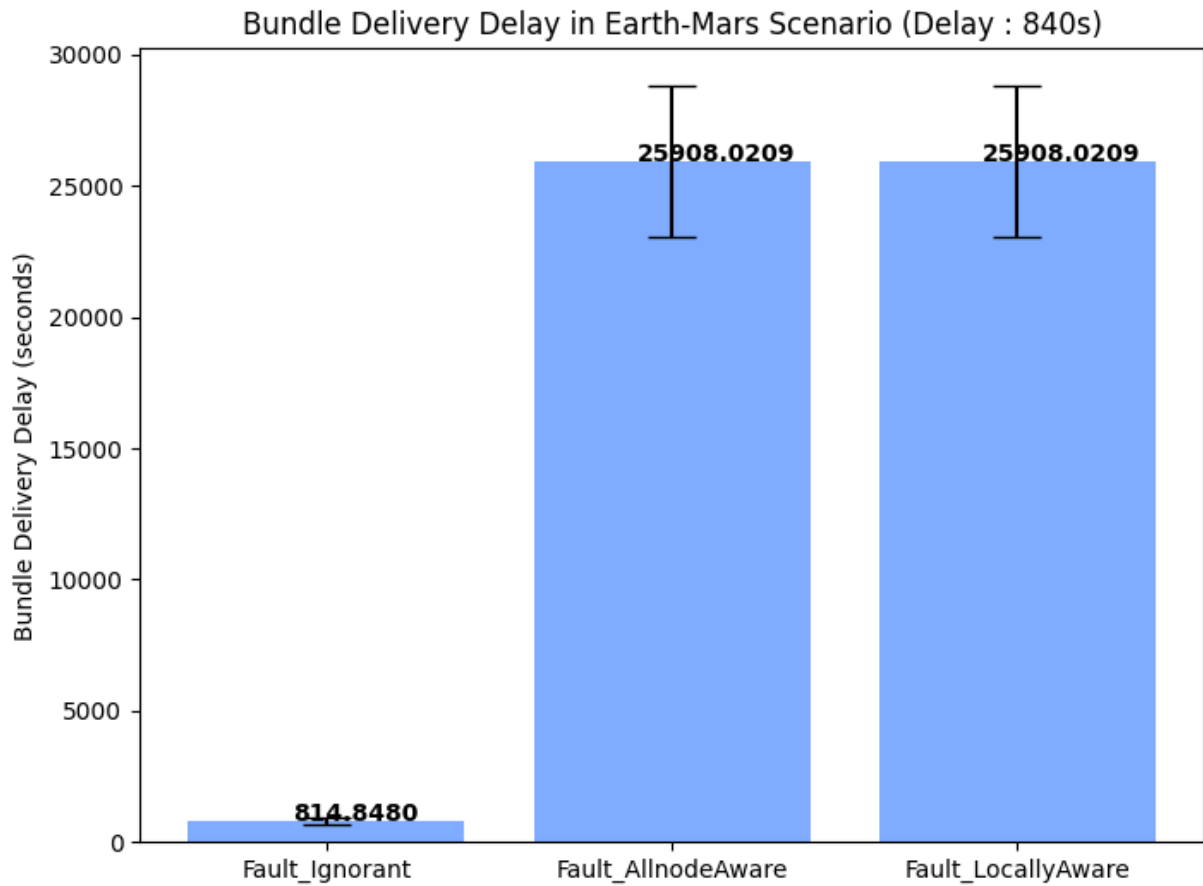


図 6.6: 地球・火星間シナリオ（距離 840 光秒）における Bundle の到達遅延

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

5.2.2 節で述べた地球-火星間のシナリオにおいては、生成した 480 回の Contact のうち 100 回の Contact を失敗させるシナリオであるため、リンク消費量は以下ようになる。

$$\text{リンク消費量} = 16\text{Bytes} \times 100 \text{ 個の } Contact \text{ 削除メッセージ} = 1600\text{Bytes} \quad (6.3)$$

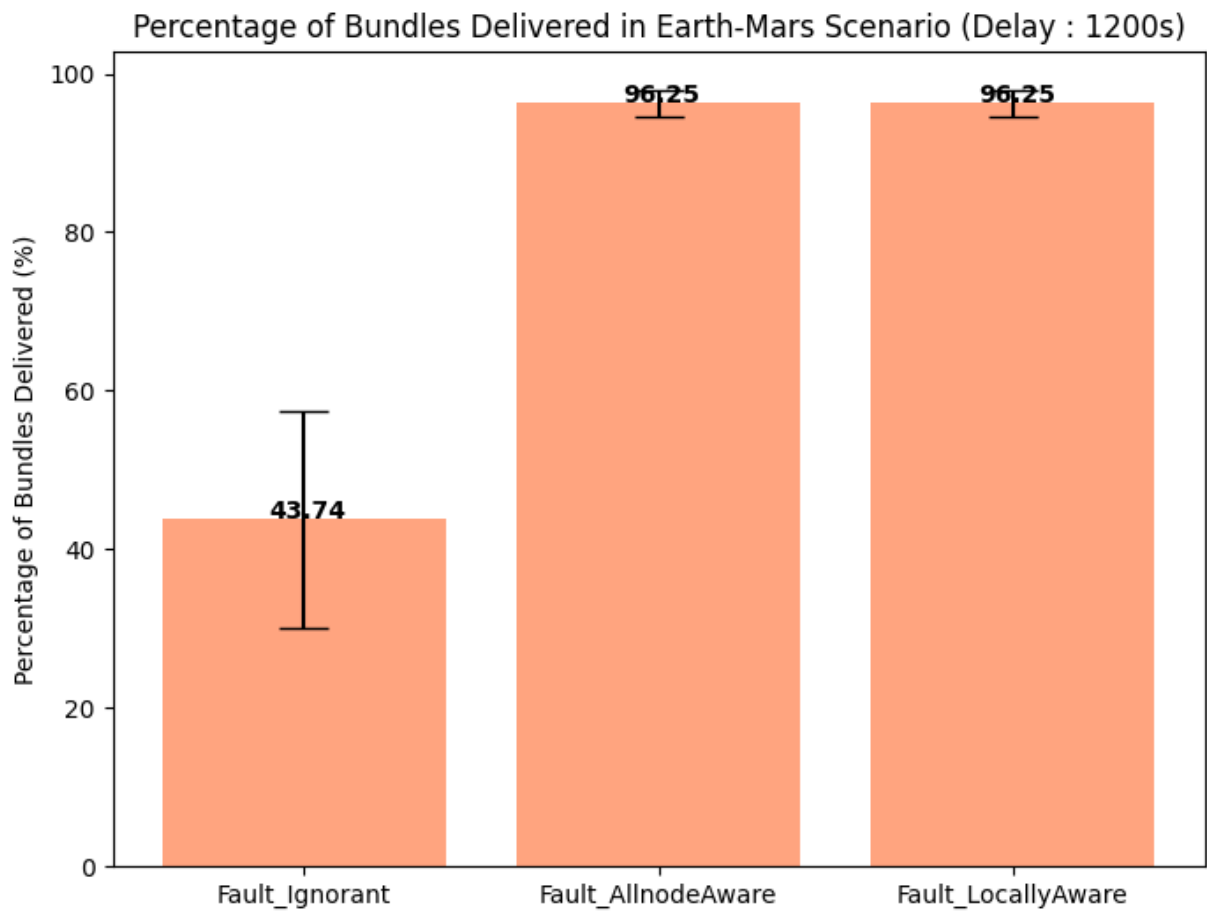


図 6.7: 地球・火星間シナリオ（距離 1200 光秒）における Bundle の到達率

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

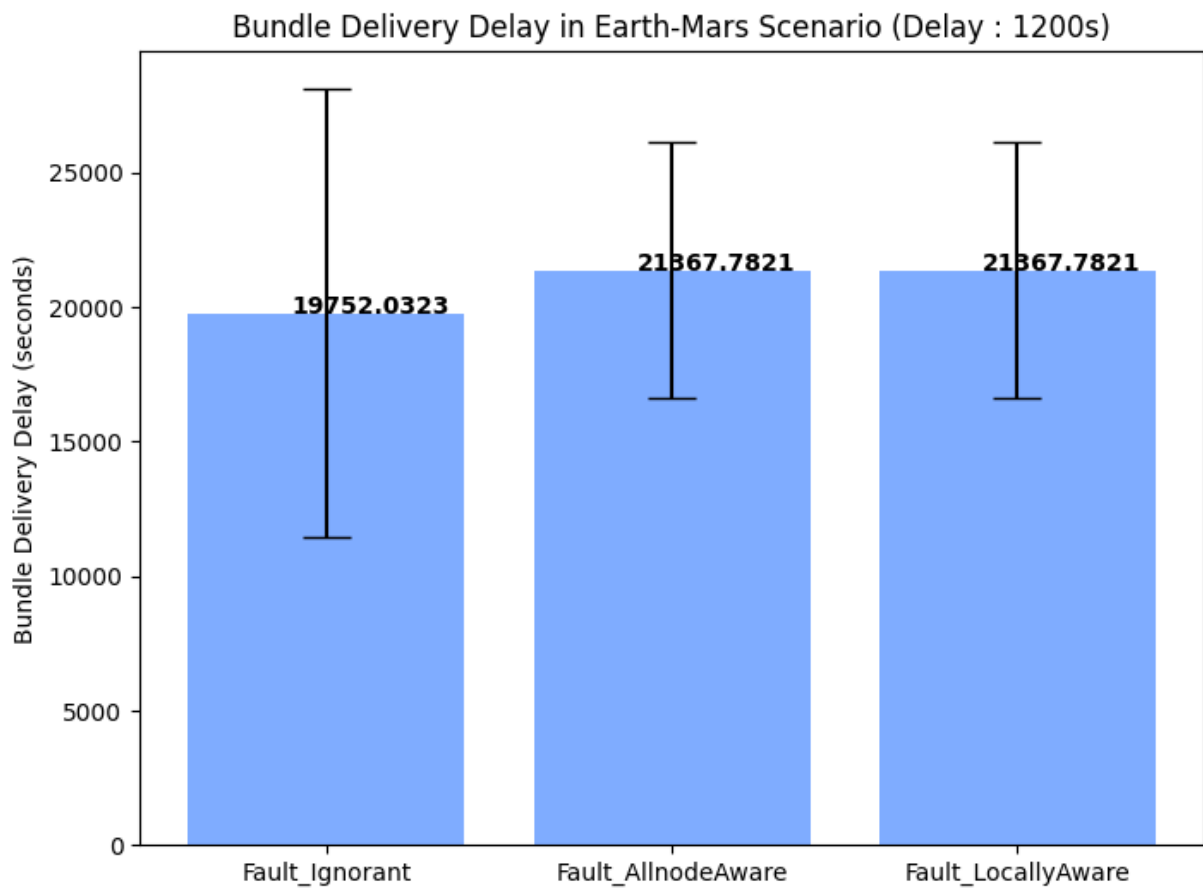


図 6.8: 地球・火星間シナリオ（距離 1200 光秒）における Bundle の到達遅延

FaultIgnorant, FaultAllnodeAware, FaultLocallyAware の表記は図 6.1 と同様である。

第7章 結論と展望

7.1 本研究のまとめ

本研究では, ContactPlan の更新は DTN における Bundle をよりよく配達できるようにする効果があることを確認するとともに, その効果は更新の範囲を天体内に限定した場合にも十分に有効であることが示された. また天体間にも拡散する既存手法の場合, 提案手法よりも天体間通信リンクを消費することが確認できた. 地球のインターネットにおける Byte 数を考慮するとかなり小さい値ではあるものの, リソースが制約された宇宙ノードにおいてはこのリンク消費を必要としないことはメリットとなりうる.

7.2 今後の課題と展望

本研究ではシミュレーションに用いるトポロジーを抽象化しており, さらにそれぞれのノードの Contact はランダムに生成を行っている. 今後は, 衛星の Contact のタイミングについて軌道シミュレーターを用いるなど, より実際の宇宙環境におけるトポロジーを考慮したシミュレーションを行うことが必要である. また本研究では単一の Contact の失敗のみに着目しているが, 実際の DTN の運用においては, 単一の Contact の失敗だけでなく, 長時間にわたる単一の Contact の一定時間だけの障害や, 複数の Contact の連続した失敗なども考慮する必要がある. これらまで対象を拡大し, 包括的な検証を行うことが今後の課題である. さらに, 本研究は Contact Plan の臨時更新を天体内に限定することを提案したが, 今後 DTN の本格的な運用に置いては, 3.4 節の Contact Plan の定期的・継続的な更新もさらなる研究・標準化が必要である. 定期的・継続的な更新においては Contact Plan のサイズ増加に対する対策が必要であり, 天体ごとに管理を行うという本研究の発想は, この問題にも適用できる可能性がある.

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、またここには列挙しきれませんでしたがその他合同研究室の教員の皆様に感謝致します。

特にほぼ全てが未経験の状態学部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せずにいた私に、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、大崎敦也氏、斉藤楽氏をはじめとする皆様に感謝申し上げます。上記の皆様には特に本研究においても多大なる助言・助力を賜りました。皆様と学び、議論し、苦境の中でも共にもがき、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。

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] CHINA NATIONAL SPACE ADMINISTRATION. International lunar research station guide for partnership (v1.0) , August 2021. https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2021/AM_3._China_ILRS_Guide_for_Partnership_V1.0Presented_by_Ms.Hui_JIANG.pdf (accessed 2025/01/18) .
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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>.
- [5] Scott Burleigh. Dynamic routing for delay-tolerant networking in space flight operations. 05 2008.
- [6] Scott Burleigh. Contact Graph Routing. Internet-Draft draft-burleigh-dtnrg-cgr-01, Internet Engineering Task Force, July 2010. Work in Progress.
- [7] 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>.
- [8] 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) .

-
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jet Propulsion Laboratory. Distrubtion tolerant network technology flight validation report: Dinet, February 2009.
- [12] 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.
- [13] McBrayer, Katherine, Chai, Patrick, and Judd Emily. Communication delays, disruptions, and blackouts for crewed mars missions. 10 2022.
- [14] 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) .
- [15] 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) .
- [16] John Segui, Esther Jennings, and Scott Burleigh. Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking. In *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, pages 1–6, 2011.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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/siryou4-3-1.pdf> (accessed 2024/12/23) .
- [20] 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/siryou2_4.pdf (accessed 2024/12/14) .
- [21] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局. 宇宙政策を巡る最近の動向と宇宙技術戦略の進め方, September 2023. https://www8.cao.go.jp/space/committee/dai107/siryou2_1.pdf (accessed 2025/01/18) .
- [22] 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/kaigisiryo/content/0210630-mxt_uchukai01-000016486_5.pdf (accessed 2024/12/23) .
- [23] 経済産業省製造産業局 航空機武器宇宙産業課 宇宙産業室. 国内外の宇宙産業の動向を踏まえた経済産業省の取組と今後について, March 2024. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/space_industry/pdf/001_05_00.pdf (accessed 2025/01/18) .
- [24] 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/siryou4.pdf> (accessed 2024/12/23) .
- [25] 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, antennatower)
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[*].dtn.routing = "cgrModelRev17"
26     dtnsim.central.contactsFile = "contactPlan/shaw_contact.txt"
27     dtnsim.node[*].dtn.routingType = "routeListType:allPaths-firstEnding
        ,volumeAware:allContacts,extensionBlock:on,contactPlan:global"
28     dtnsim.node[*].dtn.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
```
