

卒業論文 2024 年度（令和 6 年度）

トポロジー変化に耐性のある宇宙インターネットのコンタクト情報配布手法の実装と評価（仮）

慶應義塾大学 環境情報学部
鈴木 翔太

卒業論文要旨 - 2024 年度（令和 6 年度）

トポロジー変化に耐性のある宇宙インターネットのコンタクト情報配布 手法の実装と評価（仮）

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

Abstract of Bachelor's Thesis - Academic Year 2024

Implementation and Evaluation of Contact Information Distribution Methods in the Space Internet (tentative)
--

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 本研究の目的と概要	1
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
2.1 近年の宇宙開発の進展	2
2.1.1 月・火星の探査計画	2
2.1.2 深宇宙の探査計画	2
2.1.3 民間事業者の宇宙事業への参画	2
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	3
2.3 通信における宇宙の環境	3
2.3.1 大きな遅延のある通信環境	3
2.3.2 ネットワークトポロジーの変動と間欠的接続	3
2.4 Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN)	3
2.4.1 宇宙における DTN	4
2.4.2 Bundle Protocol	4
2.4.3 IPN address	5
2.4.4 Convergence Layer と LTP	5
2.4.5 既存の DTN 実装	5
2.5 DTN におけるルーティング	6
2.5.1 衛星間の Contact	7
2.5.2 Contact Graph Routing	7
第3章 DTN のルーティングと Contact Plan のアップデートにおける課題	10
3.1 宇宙インターネットにおけるルーティングのアルゴリズム	10
3.1.1 Yen routing algorithm	10
3.1.2 CGR に代替するアルゴリズムの研究	10
3.2 Contact Plan のアップデート	11
3.2.1 Contact Plan の Planned Update	11
3.2.2 Contact Plan の Unplanned Update	11
3.3 Contact Plan の Unplanned Update の問題点	11

第4章	Contact Plan の惑星内に限定した Unplanned Update の提案	12
4.1	Contact Plan の Unplanned Update を惑星内に限定する意義	12
4.1.1	Unplanned Update の情報伝播による遅延抑制	12
4.1.2	他天体に経路情報を伝播することによるリソース消費	12
4.2	Contact Plan の Unplanned Update の実装	12
第5章	評価	13
5.1	本提案の評価概要と予想	13
5.2	Omnet++ と DTNsim を用いた評価環境	13
5.2.1	宇宙を想定した衛星ネットワークのシナリオとパラメータ	13
5.2.2	シミュレーションで用いるバンドルトラフィック	13
5.2.3	Contact Plan の Unplanned Update を必要とするシナリオの生成	13
5.3	Contact Plan の Unplanned Update の DTNsim における実装	13
5.4	シミュレーション結果	13
5.4.1	Unplanned Update の情報伝播による遅延抑制の変動	13
5.4.2	他天体に経路情報を伝播することによるリソース消費の変動	13
5.5	本章のまとめ	13
第6章	結論と展望	14
6.1	本研究のまとめ	14
6.2	今後の課題と展望	14
6.2.1	実際の宇宙環境により即したシミュレーション	14
	謝辞	15

図 目 次

2.1	DTN を搭載したノード間のみでの通信	4
2.2	4 つのノードからなる DTN の例	7
2.3	2.2 における Contact Plan の例 (Contact に関する表記)	8
2.4	2.2 における Contact Plan の例 (Range に関する表記)	8
2.5	2.2 における Contact Graph の例	9

表 目 次

2.1 DTN 実装とその機能の比較	6
------------------------------	---

第1章 序論

1.1 本研究の概要

1.2 本研究の目的と概要

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[15]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。[16] 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、2.1.3の三つの視点から述べる。

2.1.1 月・火星の探査計画

このセクションでは、西側のアルテミス計画、及び中露の月・火星探査計画とそのタイムラインについて詳述する。

2.1.2 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。

2.1.3 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

宇宙における通信やネットワークに関して、地球とは次のような大きな違いが存在する。

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]

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]

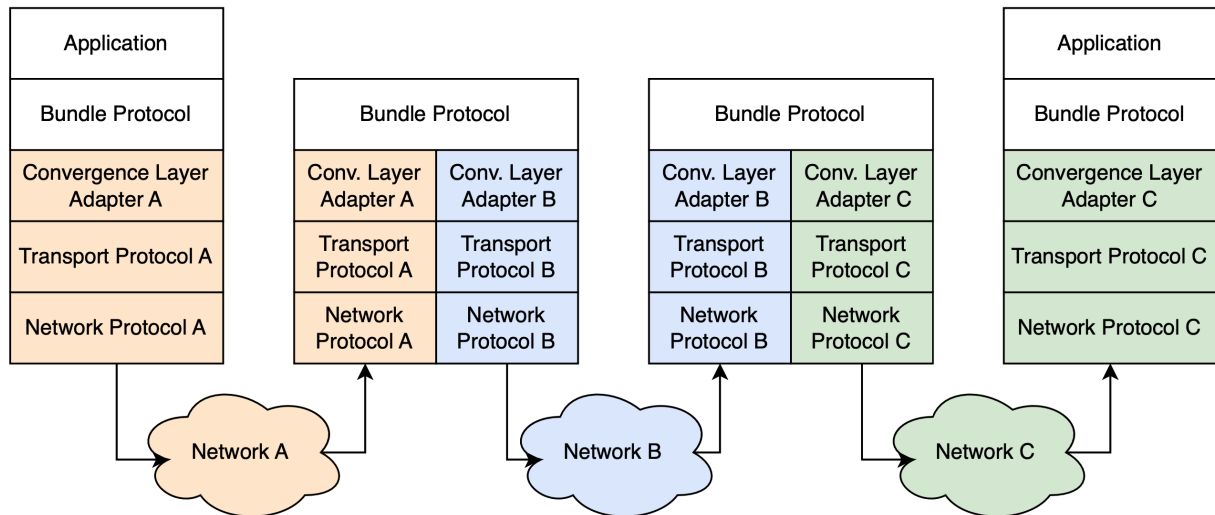


図 2.1: DTN を搭載したノード間のみでの通信

参考文献 [9]Figure1 より引用。図中の Convergence Layer (CL) については 2.4.4 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[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。

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。

2.4.3 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 2.1 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。

2.4.5 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

2.5 DTN におけるルーティング

2.3.2 節で述べた通り、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し、ネットワークのトポロジーは時間によって大きく変化する。そのため地球のネットワークとは前提となる環境が大きく異なるため、これに合わせたルーティングが必要となる。本章では、そのような DTN でのルーティングにおいて中心的な構想である Contact Graph Routing (CGR) [7] について説明する。

2.5.1 衛星間の Contact

上記のように DTN の環境では、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に転送していくことで End-to-End のデータグラムの転送を行う。DTN においては、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、Contact を正確に把握することが、効率的なデータ転送やネットワークの最適化において極めて重要な要素となっている。

2.5.2 Contact Graph Routing

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。そのため、CGR は管理する宇宙ネットワーク内の自ノードと他のノードの Contact が書かれた Contact Plan を種々のアルゴリズムによる計算を行い、最適な経路を決定し、それを元に Bundle の転送を行う。

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。

CGR の例として、2.2 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 を仮定する。このネットワークにおいて、各ノード間の Contact Plan が 2.3 と 2.4 のようである場合、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 2.5 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。

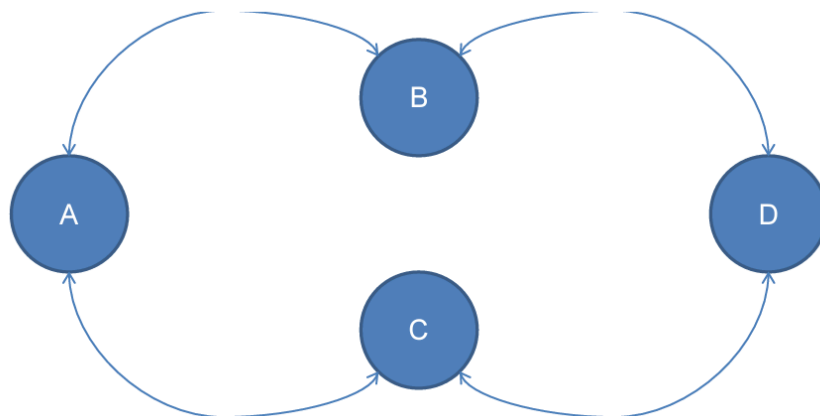


図 2.2: 4 つのノードからなる DTN の例
参考文献 [5]figure3-1 より引用

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 2.3: 2.2 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 2.4: 2.2 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。

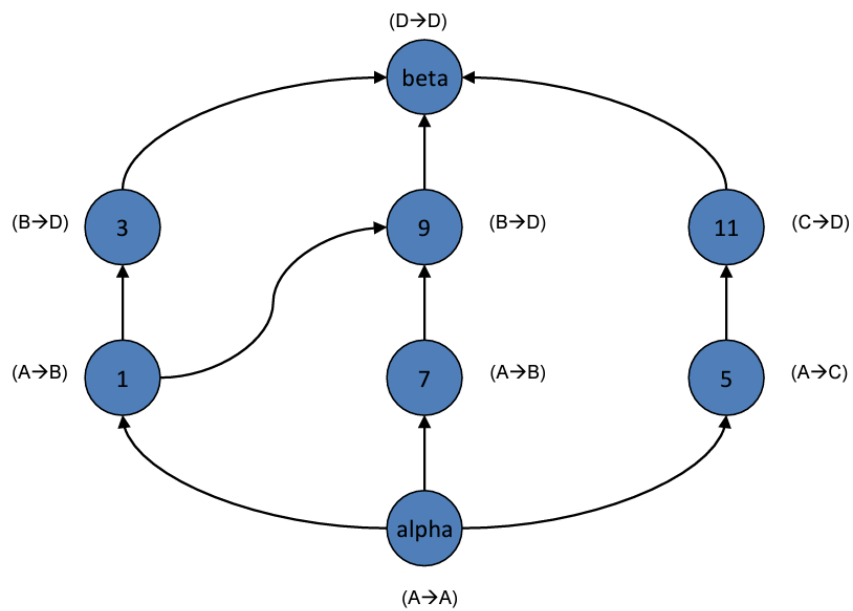


図 2.5: 2.2 における Contact Graph の例
参考文献 [5]figure3-4 より引用。

第3章 DTNのルーティングとContact Planのアップデートにおける課題

??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2で述べた通り、未だ多くの課題が残されている。CGRはそれらの課題の多い分野の一つであり、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。

3.1 宇宙インターネット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。

3.1.1 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]

3.1.2 CGRに代替するアルゴリズムの研究

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

3.2 *Contact Plan* のアップデート

既に述べた通り、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* に対しての計算手法であり、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。

3.2.1 *Contact Plan* の Planned Update

ここでは定時的な *Contact Plan* のアップデートについての述べる。

3.2.2 *Contact Plan* の Unplanned Update

ここでは故障時などの *Contact Plan* のアップデートについて述べる。先行研究として [1] を用いる。

3.3 *Contact Plan* の Unplanned Update の問題点

第4章 Contact Plan の惑星内に限定した Unplanned Update の提案

4.1 Contact Plan の Unplanned Update を惑星内に限定する意義

4.1.1 Unplanned Update の情報伝播による遅延抑制

4.1.2 他天体に経路情報を伝播することによるリソース消費

4.2 Contact Plan の Unplanned Update の実装

第5章 評価

5.1 本提案の評価概要と予想

5.2 Omnet++とDTNsimを用いた評価環境

ネットワークシミュレータ

5.2.1 宇宙を想定した衛星ネットワークのシナリオとパラメータ

5.2.2 シミュレーションで用いるバンドルトラフィック

5.2.3 Contact Plan の Unplanned Update を必要とするシナリオの生成

5.3 Contact Plan の Unplanned Update の DTNsim における実装

5.4 シミュレーション結果

5.4.1 Unplanned Update の情報伝播による遅延抑制の変動

5.4.2 他天体に経路情報を伝播することによるリソース消費の変動

5.5 本章のまとめ

第6章 結論と展望

6.1 本研究のまとめ

6.2 今後の課題と展望

6.2.1 実際の宇宙環境により即したシミュレーション

謝辞

まずは卒プロメンターの kei さん、icar でご指導くださる saikawa さん、space と icar 先輩・同期・後輩の皆様に感謝するとともに、今ここを書いている暇があれば他をかけと言われそうなので一旦この程度で謝辞は保留させていただきます。。。。。

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. 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) .
- [16] 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) .