

卒業論文 2009年度(平成21年)

DTNにおけるレプリケーション最小化のための
ライフタイム委譲を用いた転送制御手法の設計

慶応義塾大学 環境情報学部

波多野 敏明

DTN における レプリケーション最小化のための ライフタイム委譲を用いた転送制御手法の設計

本研究では、メッセージのライフタイム委譲により複製を抑制する DTN 複製管理手法 Lifetime token Delegation を提案する。都市部の交通環境を模したシミュレーションにより提案手法を評価し、手法の有用性を確認した。

交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークは、車両と歩行者などの移動体間の接近通知やメッセージング一般、交通情報システムの通信インフラなどへの活用が考えられ、今後も発展が期待される研究分野である。しかし、自動車や歩行者などの間で通信インフラストラクチャーを用いないネットワーク構築のためには、ノードの移動によりトポロジが複雑に変化し、ネットワークの分断が頻発する環境での安定した通信を実現しなければならない。近年、ネットワークの遅延や分断を克服する通信アーキテクチャとして、Delay- and Disruption- Tolerant Networking(DTN) のアーキテクチャが注目されている。DTN のアーキテクチャは分断や遅延に耐性があり、交通網上でのネットワーク構築手法としても期待されている。しかし、DTN のルーティングに関する研究は未だ途上であり、メッセージの宛先到達率向上のために行われる複製がネットワークの資源を過剰に消費するという問題があった。

提案手法である Lifetime token Delegation はメッセージの持つライフタイムに着目した新しい複製管理手法である。ライフタイムを分割して中間ノードにトークンとして委譲し、トークンを持つノードのみにメッセージの複製を許可することで、過剰なメッセージの複製を抑制し、ネットワーク資源の過剰な消費を抑制する。

本研究では交通環境を模したネットワークのシミュレーション上で提案手法である Lifetime token Delegation の評価実験を行った。既存手法との比較の中でも、宛先へのメッセージ到達率に優れることが知られた手法である MaxProp と比較して、到達率について提案手法が MaxProp とほぼ同じに保った上で、複製回数を 1/20 まで削減、ストレージの使用量を 40% まで削減するなど、既存手法に対してと大きくネットワーク資源の使用量の面で優れることを確認した。

本研究の成果により DTN のルーティング効率を改善し、交通網上でのネットワーク構築の実現に寄与できた。

キーワード

1. Delay- and Disruption- Tolerant Networking , 2. ルーティング, 3. 複製管理

Design of Lifetime token Delegation for Delay- and Disruption- Tolerant Networking

In this thesis, I proposed Lifetime token Delegation, a DTN replication management method with controlled replication based on message lifetime delegation. The proposed method is evaluated on a simulation of the transportation environment in a metropolitan city area.

Mobile Ad-hoc Network(MANET) composed by vehicles and pedestrians is proposed for various application such as proximity warning system, traffic information system and message service among nodes. However there are still many difficulties that to realise MANET with transportation. As vehicles and pedestrians move around, network architecture must support rapid and complex changes of the network topology, intermittent connectivity.

Recently, Delay- and Disruption- Tolerant Networking (DTN) architecture is being actively studied. DTN takes network delay and disconnection into account; relay node has its own storage, and when the links to the other nodes are disrupted, the relay node stores the message to avoid the message being discarded. This tolerance to disconnection and delay could be applied on MANET with transportation to solve its difficulties.

When applying DTN to MANET with transportation, routing efficiency is a significant issue. In this work, routing efficiency is defined as the amount of messages transported under the limitation of network bandwidth and storage space of the relay node. In a network with delays and disruptions, it is difficult to calculate the preferable route that is being synchronized on the entire network. Therefore, the existing works on DTN routing uses the method of replicating a bundle to increase chance of the bundles arriving the destination. However, it is necessary to minimize replication of bundles, as replicated messages occupy network bandwidth and storage space.

In Lifetime token Delegation, a bundle's lifetime is delegated to the relay nodes as a activated token. Since only the nodes that have token can replicate messages, unnecessary bundle replication can be reduced.

The proposed method is implemented and evaluated using the network simulator. The result presented that the proposed method reduced the number of times the message has replicated compared to the previous works. For example, 95% of replication and 60% of usage of storage could be reduced compared to MaxProp, which is one of best DTN routing protocol, even the reachability is similar. The proposed method improves DTN routing efficiency, leading MANET with transportation toward the actual deployment in the near future.

Keywords :

1 . Delay- and Disruption- Torelant Networking, 2. Routing, 3. Replication Management

Keio University , Faculty of Environment and Infomation Study

Toshiaki HATANO

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	本研究の関連技術	3
2.1	Delay- and Disruption- Tolerant Networking	3
2.2	DTN ルーティング	6
2.2.1	Oracle 型	6
2.2.2	Model-based 型	7
2.2.3	Epidemic 型	7
2.2.4	Estimation 型	7
2.2.5	Coding 型	7
2.2.6	Node Movement 型	7
2.2.7	DTN ルーティング分類のまとめ	8
2.3	本研究の立ち位置	8
2.4	本章のまとめ	9
第3章	本研究の関連研究	10
3.1	DTN ルーティングの機能	10
3.2	DTN ルーティングの既存研究	11
3.2.1	Epidemic	11
3.2.2	Spray and Wait	12
3.2.3	Spray and Focus	13
3.2.4	MaxProp	14
3.2.5	PRoPHET	15
3.3	既存研究手法のまとめ	16
3.4	既存研究の問題点	16
3.5	本章のまとめ	17
第4章	Lifetime token Delegation の提案	18
4.1	Lifetime token Delegation のアプローチ	18
4.2	Lifetime token Delegation の動作概要	19

4.2.1	メッセージ生成時の動作	20
4.2.2	コンタクト時の挙動	20
4.3	Lifetime token Delegation 全体の動作	22
4.4	Lifetime token Delegation + PProPHET	25
4.5	本章のまとめ	25
第5章	評価	26
5.1	評価方針	26
5.2	評価環境の設定	26
5.2.1	シミュレータ	27
5.2.2	ノードのパラメータとモビリティシナリオ	27
5.2.3	トラフィックシナリオ	28
5.3	実験結果	29
5.3.1	基準パラメータにおける比較	29
5.3.2	比較対象	30
5.3.3	ライフタイムをシミュレーションパラメータとした比較	31
5.3.4	ストレージ容量をシミュレーションパラメータとした比較	32
5.3.5	ノードの数をシミュレーションパラメータとした比較	33
5.3.6	メッセージ発生間隔をシミュレーションパラメータとした比較	34
5.4	シミュレーション結果の考察	35
5.5	本章のまとめ	35
第6章	結論	36
6.1	本研究のまとめ	36
6.2	今後の課題と展望	36
6.2.1	転送先選択と転送メッセージ選択手法に関する研究	36
6.2.2	Lifetime token の分割/委譲手法の改良	37
6.2.3	より実環境に近いシミュレーションシナリオの検討	37
	参考文献	40
	謝辞	41

目次

2.1	DTN の扱う 4 つの問題	4
2.2	ストア・アンド・フォワード方式による転送	5
2.3	バンドル層のモデル	5
2.4	リージョンと DTN ゲートウェイ	6
4.1	LtD の初期化	19
4.2	LtD のメッセージ生成時の動作	20
4.3	LtD のメッセージの複製可能判定	20
4.4	LtD のコンタクト時の動作	21
4.5	LtD のメッセージの転送に伴う Lifetime token の委譲	22
4.6	LtD を用いたメッセージ複製転送の模式図	23
4.7	メッセージの転送と Lifetime token の委譲の模式図	24
5.1	マップ - ヘルシンキ近郊	27
5.2	ライフタイムの変化に伴う影響の比較	31
5.3	ストレージ容量の変化に伴う影響の比較	32
5.4	ノード数の変化に伴う影響の比較	33
5.5	メッセージの発生間隔の変化に伴う影響の比較	34

表 目 次

2.1	DTN Routing 分類のまとめ	8
3.1	既存研究手法の比較	16
4.1	LtD + P _{Ro} PHET の手法	25
5.1	ノードに関するシミュレーションのパラメータ	28
5.2	トラフィックパラメータ	28
5.3	基準パラメータにおける各手法の比較	29

第1章 序論

1.1 はじめに

交通網上の移動体を媒体とした近接通信による通信システムは、車両と歩行者の接近通知やメッセージング一般、交通情報システムの通信インフラストラクチャーなどへの活用が考えられ、今後も発展が期待される研究分野である。しかし、基地局などの通信インフラストラクチャーを用いない通信システムを自動車や歩行者などの間で構築するためには、ノードの移動による複雑なトポロジの変化や、頻発するネットワークの分断に対して耐性のある通信アーキテクチャが必要となる。

近年、ネットワークの遅延や分断の問題を克服する通信アーキテクチャとして、Delay-and Disruption- Tolerant Networking(DTN)[1, 2, 3]が提案されている。DTNは当初、惑星間通信に伴う伝搬遅延に耐えるネットワークのアーキテクチャとして提案されていたが、分断の問題にも同様のアーキテクチャが有効であることが発見され、交通網上へのネットワーク構築に応用できるのではないかと期待されている。

交通網上でのネットワーク構築手法としてDTNを考えたとき、ルーティングの効率の問題となる。通信帯域やノードの持つストレージ容量は限られている。ルーティングの効率とは通信帯域やストレージ容量という限られた資源の中で、どれだけ多くのメッセージを転送できるかという指標である。

DTNでは遅延や分断によるネットワークトポロジや状態把握の困難さから、メッセージの宛先まで適切な経路を計算することは困難である。経路計算の困難さから生じるルーティングの不正確さを補うため、既存のDTNルーティングの研究では、同一内容のメッセージの複製を作成し、複製が一つでも宛先に到達すれば良しとする手法がしばしば用いられる。しかし、メッセージの複製はネットワーク帯域やストレージ容量を消費するため、ルーティング効率の向上のためには過剰なメッセージの複製を抑制する必要がある。

本研究では、DTNルーティングの複製管理手法を改善することで、DTNのルーティング効率改善を目指す。

1.2 本研究の目的

本研究では1.1節で述べたように、DTNにおけるルーティングの効率化を目指す。DTNルーティングの中でも複製管理機能に着目し、過剰なメッセージの複製を抑制する手法Lifetime token Delegationを提案する。

また、交通網上でのネットワーク環境を模したシミュレーションにより提案手法を既存手法と比較し、これを評価する。

1.3 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成される。第 2 章では現在提案されている DTN のアーキテクチャについてまとめる。第 3 章では DTN ルーティングにおける既存研究について整理を行い、本研究が解決すべき問題点を明らかにする。第 4 章では本研究の提案手法である Lifetime token Delegation の概念と設計を示す。第 5 章ではシミュレーション環境を用いて提案手法と既存手法の比較を行い、本提案手法の評価を行う。第 6 章では結論と今後の課題をまとめる。

第2章 本研究の関連技術

本章では本研究の関連技術として Delay- and Disruption- Tolerant Networking(DTN) の技術概要について整理し、交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークのアーキテクチャとして DTN アーキテクチャが応用可能であることを示す。また、交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークのアーキテクチャとして DTN アーキテクチャを応用する上での課題についても明らかにする。

2.1 Delay- and Disruption- Tolerant Networking

Delay- and Disruption- Tolerant Networking(DTN) は、遅延や分断のある環境でネットワークを構築するために提案された [1, 2, 3] ネットワーク手法である。DTN は MANET、路車間・車車間通信、無線センサネットワーク、水中音響通信、スニーカーネット、惑星間通信など、様々な環境下でのメッセージ配送手段として期待されている。

DTN はそれらの想定環境で生じる、これまでのネットワーク手法で扱うことが困難な以下の4つの問題を扱うべく提案されている [4]。DTN の扱う問題を図 2.1 に示す。

- 図 2.1(a) に示す、断続的な接続性 の問題は、ノード間の位置関係の変化や通信距離などの理由により、ネットワークを構成するリンクが断続的に利用不可能となるため、ネットワークが分断され、エンドノード間で通信パスを構築できない問題である。
- 図 2.1(b) に示す、大きな遅延/ 遅延の揺らぎ の問題は、断続的な接続性によりリンクが利用可能になるまで中間ノードで待機するメッセージが発生した際のキューイング遅延、リンクの物理的長さが媒体の伝搬する速さを上回るため生じる伝搬遅延により、エンドノード間で生じる遅延が大きく、予測困難となる問題である。
- 図 2.1(c) に示す、非対称な転送速度 の問題は、片方向リンクや非対称な転送速度を持つリンクによりノード間で一方的な情報伝達しかできない問題である。
- 図 2.1(d) に示す、高いエラー発生率 の問題は、無線リンクなどのエラー発生が避けられないリンクによるネットワークにおいてホップ数増加がエンドノード間のエ

ラー発生率増加に繋がり、エンドノード間での信頼性保証が困難となる問題である。

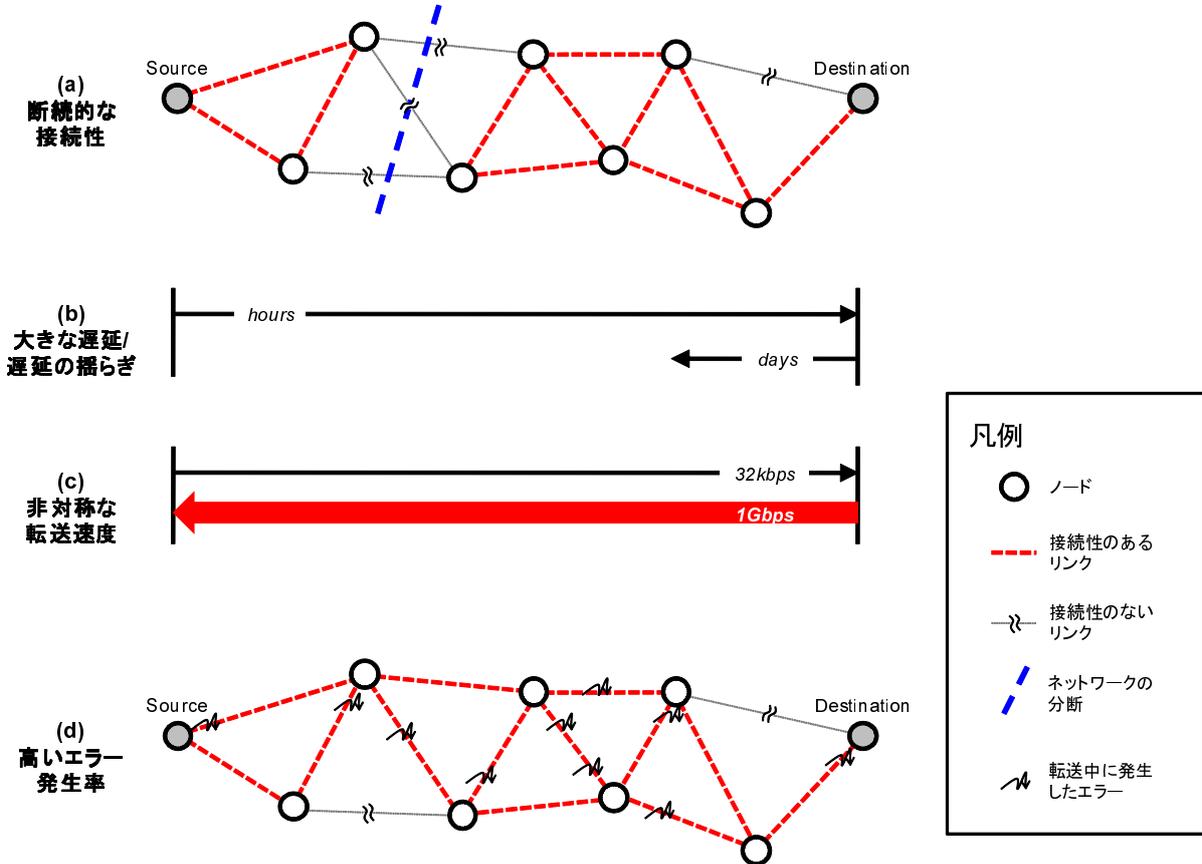


図 2.1: DTN の扱う 4 つの問題

断続的な接続性や高いエラー発生率の問題からメッセージ転送のためにエンドノード間でのセッション構築を必要とする転送形態は現実的ではない。また、断続的な接続性により生じるネットワークの分断にも耐える必要があるため、中継ノードは受信したメッセージの全部あるいは一部を蓄積し次の中継先ノードとのリンクが利用可能な際（コンタクトと呼ぶ）に転送を行う、ストア・アンド・フォワード方式で転送を行う。そのため DTN の中継ノードはメッセージを蓄積できるストレージを備える。ストア・アンド・フォワード方式の転送を図 2.2 に示す。

DTN のアーキテクチャはストア・アンド・フォワード方式の通信を行うバンドル層を構築する。バンドル層はトランスポート層上にオーバーレイする形で構築される。バンドル層のモデルを図 2.3 に示す。バンドル層ではメッセージはバンドルとも呼ばれる。バンドルは任意の長さのデータとバンドル層のヘッダからなる。

バンドル層の役割はストア・アンド・フォワード方式の通信によりエンドノード間でバンドルを送り届けることである。バンドル層がストア・アンド・フォワード方式の通信を

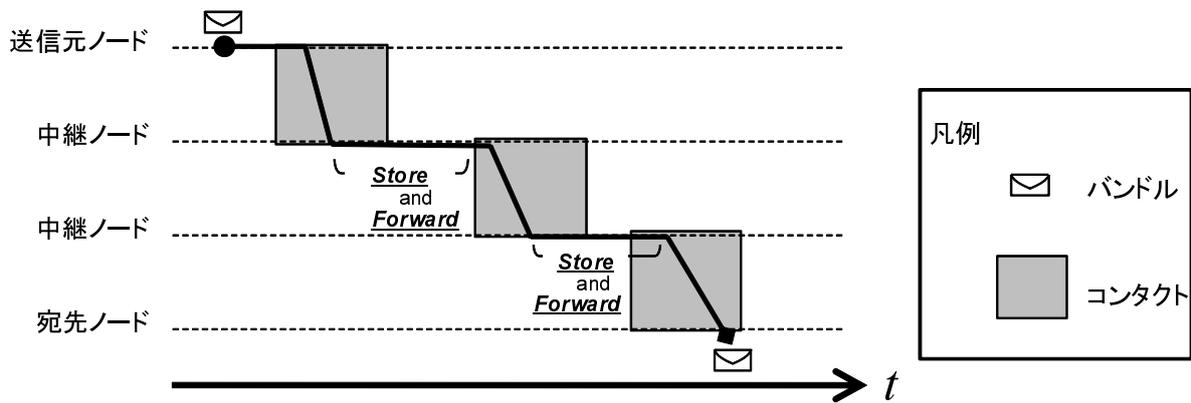


図 2.2: ストア・アンド・フォワード方式による転送

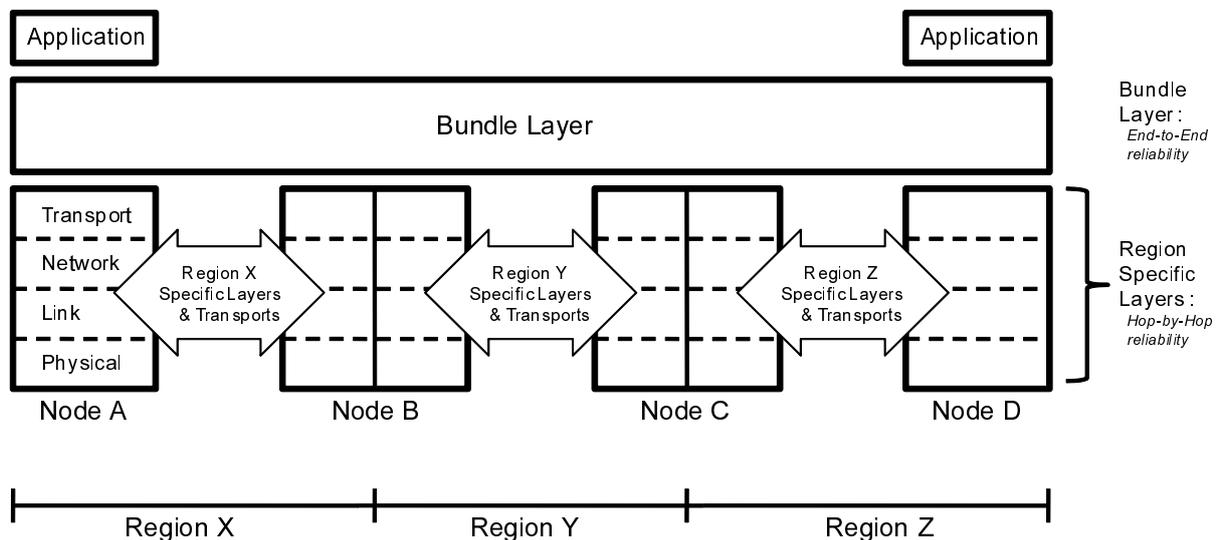


図 2.3: バンドル層のモデル

行う共通層を提供することで、トランスポート層以下の各層はそのネットワークの特性にあわせて適切な通信方式を用いることができる。

トランスポート層以下で同じ通信方式を用いるネットワークの部分をリージョンと呼ぶ。リージョンを跨ぐDTN ノードはDTN ゲートウェイと呼ばれる。リージョンの相互接続について図 2.4 に示す。DTN ではリージョンの特性に応じてトランスポート層以下の適切な通信方式を用いることができるので、たとえばインターネットのリージョンではトランスポート層以下はTCP/IP が使われるかもしれないし、水中音響通信や惑星間通信のリージョンならばそれに適した通信方式が用いられることだろう。

バンドルの信頼性や完全性はDTN の中継ノード間の転送ごとに確認され、エンドノード間ではメッセージ指向の通信モデルが提供される。

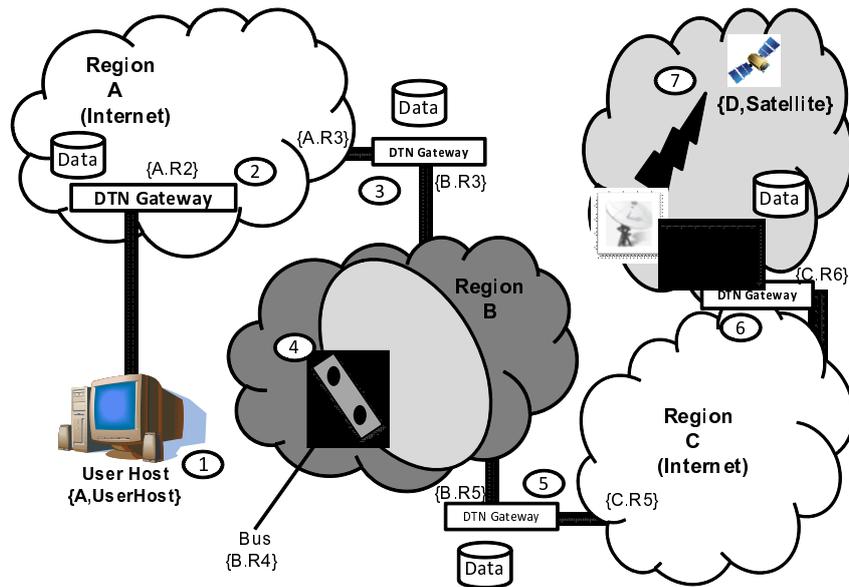


図 2.4: リージョンと DTN ゲートウェイ

2.2 DTN ルーティング

DTN のアーキテクチャは、下位層の通信方式についてリージョンの特性にあわせた適切な方式を選ぶことができる。同様に、ルーティングについてもリージョンの特性にあわせた様々な方式が提案されている。

DTN ルーティングはそのアプローチやルーティングに用いる情報、ノードへの要求などにより Oracle, Model-based, Epidemic, Estimation, Coding, Node Movement の六種類に分類されている [5]。

本節では DTN ルーティングの既存研究分野の外観を述べ、本研究の既存研究の中での大まかな立ち位置を明らかにする。

2.2.1 Oracle 型

Oracle 型のルーティングは何らかの知見 (Oracle) によりコンタクトや遅延がほぼ確実に予定できる場合、その知見を元に経路計算を行うルーティング手法である。衛星との通信や惑星間の通信などコンタクトの予定や遅延が軌道要素などの計算から明らかとなる場合が想定されている。

Oracle 型ルーティングの例として、バンドル層実装の一つである Inter-planetary Overlay Network (ION) [6] のルーティング手法である Contact Graph Routing [7] がある。また、理論的な手法としては、全てのノードのコンタクトやトラフィックのオラクルを与えられた上で線形計画法を用いて経路計算を行う Linier Programming (LP) [8] も提案されている。

2.2.2 Model-based 型

Model-Based 型のルーティングは、群衆行動や社会生活など個々の事象の正確な予測は困難だが全体としてモデル化が可能な環境を想定し、モデルやプロファイルを元にルーティングを行う手法である。

Model-Based 型ルーティングの例として、Model Based Routing [9] がある。

2.2.3 Epidemic 型

Epidemic 型のルーティングは Model-Based 型のルーティングとは対照的にモバイルセンサーネットワークやスマートダスト、災害時ネットワークなどネットワークの状況が明らかでない場合を想定するルーティング手法である。コンタクトのあるノードからノードへメッセージを次々と複製することで宛先までメッセージが到達することを期待するルーティング手法である。

Epidemic 型ルーティングの例として、Epidemic[10] や MaxProp[11] などがある。Epidemic 型の手法の詳細については 3.2 節で述べる。

2.2.4 Estimation 型

Estimation 型のルーティングは近隣ノードとの情報交換などによりネットワークの状況を推測し、メッセージが宛先に到達する見込みが高くなるよう制御を行うルーティング手法である。

Estimation 型ルーティングの例として RAPID[12] や P_{Ro}PHET[13] や PEAR[14] がある。Estimation 型の手法の詳細については 3.2 節で述べる。

2.2.5 Coding 型

Coding 型のルーティングは、Erasure コーディングやネットワークコーディング [15] など、符号化の手法によりメッセージの伝達を行う手法である。

2.2.6 Node Movement 型

Node Movement 型の手法は無人探査ロボット間の通信などを想定し、ネットワークの要求によりノードの移動を制御できる環境でノードの積極的な移動によりメッセージの運搬を行うルーティング手法である。

Node Movement 型の例として MV[16] や Ferry Initiated Message Ferry[17] がある。

2.2.7 DTN ルーティング分類のまとめ

これまで述べた事項より想定環境やアプローチの観点から DTN ルーティングの分類を表 2.1 にまとめる。

表 2.1: DTN Routing 分類のまとめ

分類名	想定環境	アプローチ
Oracle	惑星間通信 静的経路制御	事前に与えられる データの活用
Model-based	MANETs Cars in Highway	事前に与えられる モデルの活用
Epidemic	MANETs Sensor-net etc...	メッセージの多数複製
Estimation	MANETs Sensor-net etc...	ネットワーク状況の推測
Coding	MANETs	ネットワークコーディング
Node Movement	Robots	ノードの移動制御

2.3 本研究の立ち位置

交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークでは互いの位置関係が刻々と変化するためノード同士が通信可能な時間は限られ、ネットワークの分断が発生する。ネットワークの分断を想定したアーキテクチャである DTN のアーキテクチャは想定環境の要求と合致しており、本研究では交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークの構築手法として DTN に着目する。

ルーティングに関して本研究の想定環境では、コンタクトやトラフィックの予測は困難なため Oracle 型の手法は適用できず、ネットワークの要求に基づくノードの移動制御も困難なため Node Movement 型の手法も適用できない。Coding 型の手法は通信範囲に多数のノードを含む密なリンクで帯域を有効活用できる [15] が、本研究の想定環境は通信範囲に多数のノードが含まれない希薄な環境のため Coding の手法も考慮しないものとする。Model-based 型には高速道路などで車群をモデル化する試み [18] があるが、一般性に欠けるため本研究のスコープ外とする。以上の考察より、ルーティングについては Epidemic 型と Estimation 型の手法を考慮すべきことがわかる。

2.4 本章のまとめ

本章ではDTNのアーキテクチャとDTNのルーティングについて外観を示した。また、交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークの構築にDTNのアーキテクチャが適することを明らかにし、ルーティングについてはEpidemic型とEstimation型の手法を考慮すべきことを明らかにした。

次章では、Epidemic型とEstimation型に分類されるDTNルーティングの既存研究について述べる。また、既存手法を交通網上の移動体による通信インフラを用いないネットワークに用いる際の問題点を明らかにする。

第3章 本研究の関連研究

本章では2.3での考察に基づき、Epidemic型とEstimation型のDTNルーティングの既存研究について述べる。既存研究の整理のため、DTNルーティングの機能を送信先の選択機能、送信メッセージの選択機能、破棄メッセージの選択機能、複製の管理機能の4つに分類する。分類した4つの機能についてDTNのルーティングにおける既存研究を整理した上で、その問題点を述べる。

3.1 DTNルーティングの機能

本論文ではDTNルーティングの機能を4つに整理する。

- 転送先の選択 機能は、あるメッセージの転送先となり得るノードを選択する機能である。ノードとコンタクトがあったとき、そのノードがあるメッセージを転送先として適当なノードがどうか判断し、転送先として適当なノードならばあるメッセージの転送先として選択し、転送先として不適当なノードならばあるメッセージの転送先から除外する。手法によっては、あるメッセージの転送先として現在コンタクトのある複数のノードを選択することも、現在コンタクトのあるノードから一つのノードも選択しないこともあり得る。また、複数のノードを転送先として同時に選択し得る手法においては、転送先として選択されたノードの間で転送先としての優先順位を与えることがある。
- 転送メッセージの選択 機能は、メッセージの送信順序を決定する機能である。コンタクトの際、ノードのストレージの中に複数の転送可能なメッセージがある場合、どのメッセージから送信するべきか判断する。
- 破棄メッセージの選択 機能は、メッセージの破棄順序を決定する機能である。メッセージの蓄積によりストレージの容量を超過した際、どのメッセージから破棄するべきか判断する。
- 複製の管理 機能は、複製の生成時期の決定やストレージの容量超過以外の理由による複製破棄の決定を行う機能である。たとえば、メッセージを生成したノードでのみメッセージの複製を行う、メッセージが宛先に到達した際に受信確認メッセージ(Acknowledge: Ack)を発信しAckを受信したノードではメッセージの複製を破棄する、などの機能である。

3.2 DTN ルーティングの既存研究

本節では、Epidemic 型 2.2.3 と Estimation 型 2.2.4 に分類されるルーティング手法について、既存研究を整理する。なお、これらの手法の共通点は、メッセージの複製を行い、ネットワークそれ自体の情報（コンタクトの履歴から推測したトポロジ情報やメッセージの付加属性）のみに基づいて動作する点である。

3.2.1 Epidemic

Epidemic[10] は 2000 年に vahdat らによって提案された手法である。

Epidemic は、ネットワークの状況が全く不明で、トポロジなどの推測が全く不可能でも、コンタクトのあったノードの間ですべてのメッセージを複製し合い、ノードが受信したすべてのメッセージを蓄積すれば、メッセージの複製があたかも疫病が伝染するようにネットワーク中に拡散し、いずれ宛先へとメッセージが届く、という原理に基づいている。

Epidemic ではノード A がノード B とコンタクトした際、ノード A は自身の保持しているメッセージの一覧 SV_A をノード B へと送信する。ノード B は自身の保持するメッセージの一覧 SV_B と $\neg SV_A$ の論理積を取り、ノード A に自身へと送信するよう要求する。ノード A は、要求に従い $SV_B + \neg SV_A$ に含まれるメッセージをノード B に送信する。同様の手続きをノード B からノード A に対しても行い、ノード A とノード B の間でメッセージが交換される。ノード A とノード B が他のノードとコンタクトした際も同様である。

Epidemic の手法を DTN ルーティングの 4 つの機能分類の観点からまとめる。

- 転送先選択機能
そのメッセージの複製を持たないノードすべてを転送先とする。
- 転送メッセージ選択機能
コンタクトの際の通信帯域が不十分な場合を考慮していないため、原論文中に転送メッセージの選択機構に関する提案はない。本論文中では単純な First-In-First-Out(FIFO) の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより転送を行うこととする。ただし、現在コンタクトしているノードを宛先するメッセージについては優先して転送を行う。
- 破棄メッセージ選択機能
原論文中の提案に従い、FIFO の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより破棄を行う。ストレージ容量がメッセージの量に対して十分な場合、適切な破棄メッセージ選択機能であるとされる。
- 複製管理機能
原論文中では評価こそされていないものの Ack についての言及がある。本論文中では Ack を備える Epidemic を扱う。

3.2.2 Spray and Wait

Spray and Wait[19] は 2005 年に Spyropoulos らによって提案された手法である。

Spray and Wait の手法は、単一のメッセージあたりに作成可能な複製の数を制限することで、コンタクトの帯域やストレージの容量について効率化を狙う手法である。特にノードに移動性のある環境では積極的な転送を行わずとも、ストレージの中で”待っている”メッセージの複製がコンタクトにより宛先に到達する可能性があり、Spray and Wait はこの環境の特性を活用する手法と言える。

Spray and Wait では、メッセージは 2 つの段階を経て転送される。生成元ノードで生成されたメッセージはある整数 L を与えられる。メッセージの複製はそれぞれ Forwarding token と呼ばれる整数値 n を保持し、生成されたノードでは $n = L$ となる。

今、Forwarding token $n > 1$ を持つあるメッセージの複製を保持するノード A がメッセージの複製を持たないノード B とコンタクトしたとき、ノード B にメッセージは転送され新たな複製がノード B に蓄積される。ノード A に蓄積されているメッセージの複製の持つ Forwarding token の値は $n_{new} = \lfloor n/2 \rfloor$ となり、ノード B に蓄積されたメッセージの複製も同じ Forwarding token の値 $n_{new} = \lfloor n/2 \rfloor$ を持つ。これを Binary Spray 方式と呼ぶ。メッセージの複製が持つ Forwarding token の値 $n = 1$ の時、ノード A は宛先ノードとコンタクトしたときのみメッセージを転送する。以上の仕組みにより、ネットワーク全体でメッセージの複製の数が生成時に与えられた L 個までに制限される。

なお、メッセージの複製が Forwarding token の値 $n > 1$ で新たに複製を作成できる状態のとき、これを Spray 段階と呼び、その後 Forwarding token の値が $n = 1$ となり宛先ノードとのコンタクトによる直接の配送を待つ状態を Wait 段階と呼ぶ。

Spray and Wait の手法を DTN ルーティングの 4 つの機能分類の観点からまとめる。

- 転送先選択機能

Spray 段階ではメッセージの複製を持たないノードすべてを転送先とする、Wait 段階ではメッセージの宛先ノードのみを選択する。

- 転送メッセージ選択機能

原論文中に転送メッセージの選択機構に関する考察はない。本論文中では単純な First-In-First-Out(FIFO) の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより転送を行うこととする。また、現在コンタクトしているノードを宛先とするメッセージについては優先して転送を行うものとする。

- 破棄メッセージ選択機能

原論文中に破棄メッセージの選択機構に関する提案はない。本論文中では単純な FIFO の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより破棄を行う。

- 複製管理機能

Forwarding token により複製の数をメッセージの生成時に与えた L 個までに制限する。

3.2.3 Spray and Focus

Spray and Focus[20] は Spray and Wait の改良手法として 2007 年に Spyropoulos らによって提案された手法である。

Spray and Focus の手法は、Spray and Wait の Wait 段階を Focus 段階と呼ばれる段階で置き換え、複製を分配し終えた後にもメッセージをノードからノードに転送することで転送成功率の向上を狙う手法である。

Spray and Focus では、Focus 段階での転送先選択に Single-copy Utility-based Routing と呼ばれる手法を用いる。Single-copy Utility-based Routing ではメッセージの宛先と最後にコンタクトした時刻が自身と比較して一定以上新しいノードを転送先として選択する。

Single-copy Utility-based Routing の仕組みは以下の通りである。ノード i はネットワーク中の任意のノード j について、 $\tau_i(\cdot)$ と $U_i(\cdot)$ を与える。 $\tau_i(j)$ はノード i がノード j と最後にコンタクトした時刻からの経過時刻である。また、 $\tau_i(i) = 0$ 、ノード i とノード j が過去にコンタクトしていないとき $\tau_i(j) = \infty$ とする。 $U_i(\cdot)$ は $\tau_i(\cdot)$ について単調減少かつ $U_i(i) \geq U_i(j), \forall i, j$ となる関数である。関数 $U(\cdot)$ については数種類の提案がある [21] が、本論文中では最も単純かつなことから $U_i(j) = T_{now} - \tau_i(j)$ を扱う。なお T_{now} は現在時刻を表す。ノード A とノード B がコンタクトしたとき、ノード A の持つ宛先がノード D である Focus 段階のメッセージについて、 $U_B(D) > U_A(D) + U_{th}$ が成り立つとき、Single-copy Utility-based Routing はノード B を転送先として選択する。なお、 U_{th} はアルゴリズムのパラメータである。

Spray and Focus の手法を DTN ルーティングの 4 つの機能分類の観点からまとめる。

- 転送先選択機能

Spray 段階ではメッセージの複製を持たないノードすべてを転送先とする、Focus 段階では Single-copy Utility-based Routing と呼ばれる手法で転送先の選択を行う。

- 転送メッセージ選択機能

原論文中に転送メッセージの選択機構に関する提案はない。本論文中では単純な First-In-First-Out(FIFO) の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより転送を行うものとする。また、現在コンタクトしているノードを宛先とするメッセージは優先して転送を行い、次に Spray 段階にあるメッセージの転送を、最後に Focus 段階にあるメッセージの転送を行うものとする。

- 破棄メッセージ選択機能

原論文中に破棄メッセージの選択機構に関する提案はない。本論文中では単純な FIFO の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより破棄を行う。

- 複製管理機能

Forwarding token により複製の数をメッセージの生成時に与えた L 個までに制限する。

3.2.4 MaxProp

MaxProp[11] は 2006 年に Burgess らによって提案された手法である。

MaxProp は転送先の選択を行わず、転送メッセージの選択と破棄メッセージの選択によりメッセージの宛先への到達率向上を狙う手法である。MaxProp では、各ノードは保持するメッセージに優先順位を付け、ストレージの容量が不足した場合は優先順位の低いメッセージから破棄を行い、ノードと接触した際は優先順位の高いメッセージから順に複製を行う。

優先順位の決定は次の通り。まず、MaxProp では各メッセージがこれまでに複製された回数 hop を記録しており、 $hop < th$ となるメッセージについて hop の少ない順に高い優先順位を与える。なお th はノードの過去の接触の平均帯域と現在のストレージの使用量から求められる閾値である。次いで、 $hop \geq th$ のメッセージについて、メッセージの宛先へのパスコスト c を求め、パスコストの小さい順にメッセージに高い優先順位を与える。なお、 c は過去の接触履歴に基づき求められる。

th の計算手順は次の通り。各ノードは過去の接触の平均帯域 x と現在ストレージに蓄積されているメッセージの合計容量 b を持つ。容量 p を以下のように求める。

$$p = \begin{cases} x & (x < b/2) \\ \min(x, b - x) & (b/2 \leq x < b) \\ 0 & (b \leq x) \end{cases}$$

このとき、 $p > 0$ ならば $i = 0$ から順に i の値を 1 ずつ加算し、 $hop < i$ となるメッセージの合計容量が p を超える最も小さい i を th とする。

c の計算手順は次の通り。各ノードは、ノード i が存在を知っているノードの集合 s 中のすべてのノード $j \in s$ について値 f_j^i を与える。まず、すべてのノードについて $f_j^i = 1/(|s| - 1)$ が初期値として与えられる。ノード i がノード j と接触したとき f_j^i の値は 1 加算され、 f^i の値の合計が 1 となるよう正規化される。さらに、お互いの保持する f を交換し、各要素の更新時刻を比較してより新しい要素を集めて新たな f とする。 $1 - f_j^i$ をノード i からノード j へのリンクのコストとして、メッセージの宛先 d についてノード i からの最小のパスコストを求め c とする。

MaxProp の手法を DTN ルーティングの 4 つの機能分類の観点からまとめる。

- 転送先選択機能
そのメッセージの複製を持たないノードをすべて転送先とする。
- 転送メッセージ選択機能
複製回数が一定より少ないメッセージを優先して転送。その後、宛先へのパスコストが小さいメッセージを優先して転送。
- 破棄メッセージ選択機能
複製回数が一定より多く m 宛先へのパスコストが大きいメッセージを優先して破棄。その後、複製回数が多いメッセージを優先して破棄。
- 複製管理機能
Ack により宛先に到達したメッセージの複製をネットワーク中から消去する。

3.2.5 PRoPHET

PRoPHET[13] は 2004 年に Lindgren らによって提案された手法である。

PRoPHET の手法はメッセージの宛先に対して、各ノードが到達に寄与する確率を算出し、より高い宛先への到達確率を持つノードへとメッセージを複製していく手法である。

PRoPHET では各ノードが以下の手続きに従い、宛先ノードへメッセージを転送できる確率を算出する。 $P_{(A,B)} \in [0, 1]$ をノード A からノード B へメッセージを転送できる確率として求める。初期値を P_{init} として、ノード A が他のノードとコンタクトがないとき、一定時間間隔で $P_{(A,B)}$ を以下のように update する。

$$P_{(A,B)} = P_{(A,B)old} + (1 - P_{(A,B)old}) * P_{init}$$

さらに長期間、他のノードとコンタクトがない場合は定数 $\gamma \in [0, 1)$ に基づいて確率の aging を行う。 k は最後に aging が行われた時刻から起算した単位時間である。

$$P_{(A,B)} = P_{(A,B)old} * \gamma^k$$

ノード A がノード V とコンタクトした際、以下の式に従い確率を update する。なお $\beta \in [0, 1)$ は定数である。

$$P_{(A,B)} = P_{(A,B)old} + (1 - P_{(A,B)}) * P_{(A,C)} * P_{(C,B)} * \beta$$

PRoPHET における転送先選択と転送メッセージ選択の機能には数種類バリエーションがある [22] が、本論文では GRTRMax と呼ばれる転送先選択と転送メッセージ選択について扱う。GRTRMax では、ノード A とノード B がコンタクトしたとき、ノード A の持つメッセージの宛先 D に対して $P_{(B,D)} > P_{(A,D)}$ が成りてばノード B をメッセージの転送先として選択する。転送メッセージの選択では、 $P_{(B,D)}$ が大きいメッセージを優先して転送するメッセージとして選択する。

PRoPHET の手法を DTN ルーティングの 4 つの機能分類の観点からまとめる。

- 転送先選択機能
メッセージの宛先への到達確率が自身より高いノードを転送先として選択する。
- 転送メッセージ選択機能
転送後の宛先への到達確率がより高いメッセージから転送するメッセージとして選択する。
- 破棄メッセージ選択機能
FIFO の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより破棄を行う。
- 複製管理機能
原論文中には言及がないものの、その後 PRoPHET における Ack について規定した文章がある [22] ことから、本論文では Ack を備えるものを扱う。

3.3 既存研究手法のまとめ

3.2 章に述べた既存研究の概要より、各手法の比較を表 3.1 にまとめる。

表 3.1: 既存研究手法の比較

手法名	転送先の選択 *1	転送メッセージ の選択 *2	破棄メッセージ の選択	複製の管理
Epidemic	なし	FIFO	FIFO	Ack
Spray and Wait	なし	FIFO	FIFO	複製回数の 制限
Spray and Focus	なし, Single-copy Utility-based *3	FIFO *4	FIFO	複製回数の 制限
MaxProp	なし	パスコストと 複製回数による	パスコストと 複製回数による	Ack
PRoPHET	GRTRMax	GRTRMax	FIFO	Ack

- *1: すべての手法共通で、既にメッセージを持っているノードは転送先から除外する。また、“なし”はすべてのノードをメッセージの転送先として選択することを表す。
- *2: すべての手法共通で、宛先とコンタクトがあるメッセージは最優先される。
- *3: Spray 段階では選択なし、Focus 段階では Single-copy Utility-based となる。
- *4: ただし、Spray 段階のメッセージを優先。

3.4 既存研究の問題点

Epidemic 型や Estimation 型に属する既存の DTN ルーティング手法では、メッセージの宛先への到達率向上のため、メッセージを次々に複製する手法が用いられる。

しかし、中継ノードにメッセージの複製を許可する Epidemic や MaxProp、PRoPHET といったルーティング手法では、メッセージの複製から複製が生まれ、指数関数的にメッセージの数が増加する。DTN のノードが持つストレージの容量と通信の帯域は有限であり、中継ノードが無秩序にメッセージの複製を行うとそれらの資源を急速に使い果たしてしまい、結果的にメッセージの到達率向上のための複製がメッセージの到達率を下げてしまう問題がある。MaxProp は転送メッセージの選択と破棄メッセージの選択の工夫により、PRoPHET は転送先の選択と転送メッセージの選択によりこの問題の解決を狙う。一方で、Spray and Wait や Spray and Focus のように複製の個数自体を単純に制限してしまう複製管理手法によるアプローチもある。しかし、これらの手法はネットワークの状況把握が難しい DTN の環境で、どのように複製の個数を設定するのか、という点が問題になる。

そこで、メッセージの到達率を維持しながらメッセージの複製を最小限にとどめる新たな複製管理手法が必要とされている。

3.5 本章のまとめ

本章では Epidemic 型、Estimation 型に分類される DTN ルーティングの既存研究について整理した。DTN ルーティングの機能を転送先の選択機能、転送メッセージの選択機能、破棄メッセージの選択機能、複製の管理機能の 4 つに分割し、既存研究のそれぞれの機能について明らかにした。また、既存手法の分析を行い、問題点を明らかにした。

次章では本章で述べた関連研究の問題点を受けて、新しい複製管理手法である Lifetime token Delegation を提案し、その概要を述べる。

第4章 Lifetime token Delegationの提案

3.4節で述べた関連研究の問題点を受けて、本章では新しい複製管理手法である Lifetime token Delegation(LtD) を提案し、その設計について述べる。

4.1 Lifetime token Delegationのアプローチ

1.1節ではDTNのネットワーク資源の有効活用のためにはメッセージの複製を必要最小限にとどめることが肝要であると述べた。

メッセージの複製を抑制するアプローチの一つは、転送先の選択機能と転送メッセージの選択機能で、より宛先への到達に寄与するメッセージのみ複製するよう、転送の絞り込みを的確に行うことである。しかし、ノードの移動性の高い環境では宛先への到達率を正しく判定することは原理的に困難であるため、この手法は用いることはできない。また、Ackもメッセージの複製を抑制するアプローチの一つであるが、原理的に宛先へ届いた後の複製のみ抑制され、宛先に届くまでの複製回数を抑制することができない。そこで、転送先や転送メッセージの選択による抑制やAckによる抑制とも異なる、新たな複製管理機構を提案する必要がある。

交通網上の移動体によるネットワークを想定した場合、積極的に転送を行わなくとも時間の経過によりノードの移動性によってメッセージが宛先に到達する可能性がある。つまり、メッセージをノードに蓄積し、一定の時間転送を行わずに待機させることは、ノードの移動性に基づいてメッセージの複製を伴わない転送と同様の効果が期待できる。他方で、将来の宛先とのコンタクト確率の高いノードにメッセージを蓄積するほどノードの移動性は活用できるが、遅延や分断のある環境では適切なノードの選択がそもそも困難であり、やはり複製による確率向上が必要である。

ここで、どれだけ複製を作成するのが効率的かという課題について明らかにする必要がある。まず、複製回数の制限は単純であるがネットワークの規模やメッセージのライフタイムの長さに対して柔軟性に欠けるため、この手法は適切でない。ノードの移動性とメッセージの蓄積に基づく配送は、どれだけ時間メッセージがノードに蓄積されたかにより転送率が高まると考えられる。つまり、長い時間ノードに蓄積されることのできるメッセージは複製の個数が少なくとも宛先への到達が見込め、逆にノードに短い時間しか蓄積されないメッセージは宛先への到達の見込みが低いので複製の個数を増やさねばならない。

提案手法である Lifetime token Delegation では、メッセージのライフタイムに着目して複製のトークンとすることで、ライフタイムの残りが少ないメッセージの複製を積極的に行い、ライフタイムの長いメッセージは消極的に複製を行う。

4.2 Lifetime token Delegation の動作概要

Lifetime token Delegation ではルーターはメッセージと関連づけられたトークンを持つ。トークンは有効期間を持ち、メッセージのライフタイム (メッセージが作成された時刻から TTL が終了するまでの期間) の一部を指す。現在時刻が有効期間となるトークンを持つノードでは、そのトークンと対応するメッセージの複製を行うことができ、現在時刻が有効期間でないトークンを持つノードはメッセージの複製が抑制される。

Lifetime token Delegation ではメッセージのライフタイム中の任意の時間を有効期間として指し示すトークンをネットワーク中にただ一つだけ存在するよう制御する。これによりネットワーク中で新たに複製を行えるメッセージの複製はただ一つとなり、無秩序に複製が行われなくなる。

Lifetime token Delegation で各ルーターの持つ情報と初期化処理について擬似コードで図 4.1 に示す。

```
// Lifetime token Delegation を実装するすべてのルーターは
// LtD のインスタンスを持つ
class LtD
{
    class Token{
        public double timeBegin, timeEnd;

        // トークンはその有効期間の (開始, 終了) 時刻を持つ (省略)
        public Token(double timeBegin, double timeEnd) {...}
    }

    // LtD クラスはメッセージの id (String 型) とひもづけられた Token を持つ
    Map<String, Token> tokens;

    public LtD()
    {
        // トークンはノード毎に管理される
        tokens = new Map<String, Token>();
    }
}
```

図 4.1: LtD の初期化

4.2.1 メッセージ生成時の動作

メッセージ生成時、メッセージの発信元ノードではメッセージに対応する最初のトークンが生成される。最初のトークンはメッセージの生成時刻からライフタイムが終了する時刻までを有効期間として持つ。メッセージ生成時の動作を図 4.2 に擬似コードにより示す。

```
// メッセージが生成された際、そのLifetimeと等しい有効期間のTokenを与える
public void createNewMessage(Message m)
{
    // getTime() => 現在時刻を返す関数
    // Message.getTtl() => メッセージのTTLを返す関数
    tokens.put(m.getId(), new Token(getTime(), getTime() + m.getTtl()));
}
```

図 4.2: LtD のメッセージ生成時の動作

4.2.2 コンタクト時の挙動

ノードとノードがコンタクトした際、コンタクト相手が宛先となるメッセージがある場合、そのメッセージは無条件かつ最優先で転送される。

コンタクトしたノードがメッセージの宛先でない場合、メッセージのトークンが確認される。トークンが現在時刻を有効期間として含むときメッセージは複製転送を行い、そうでなければメッセージは転送されない。

複製の可否の判定を擬似コードで図 4.4 に示す。

```
// このノードの持つtokenが現在時刻を有効期間に含むとき、
// メッセージは複製可能
public boolean canReplicate(Message m)
{
    Token token = tokens.get(m.getId());
    if( token.timeBegin <= getTime() && getTime() < token.timeEnd ) {
        return true;
    }
    return false;
}
```

図 4.3: LtD のメッセージの複製可能判定

コンタクト時のノードの動作を擬似コードで図 4.5 に示す。

```
// コンタクトと転送可能メッセージの有無は一定間隔で再チェックされる
// なお、擬似コードの簡単のため同時に転送されるメッセージは 1つとする
public void update()
{
    // 転送可能なメッセージのリスト
    Queue<Message> relayTransferQueue = new Queue<Message>();

    // 宛先ノードへ配送できるメッセージがあれば優先して転送
    if( exchangeDeliverableMessages() != null ) {
        return;
    }

    // List<Message> messages; ノードの持つメッセージのリスト
    for( Message m : messages ) {
        // メッセージが複製可能な場合はコンタクトのあるノードすべてを
        // 候補として選び出す (LtDは選択の機能を持たない)
        if( canReplicate(m) ) {
            relayTransferQueue.add(m);
        }
    }

    // 転送先選択機能と転送メッセージ選択機能により
    // メッセージと転送先の優先順位が決定される
    Collections.sort(relayTransferQueue, someSortAlg);

    // 最も優先順位の高いメッセージを転送
    messageSend(relayTransferQueue.pop());
}
```

図 4.4: LtD のコンタクト時の動作

メッセージの複製が行われる場合、複製元のノードが持つトークンの有効期間を n 分割し、分割した有効期間の現在時刻を含む部分を複製先のノードにトークンとして渡す。今回の実装では $n = 3$ とおいた。複製先に渡された有効期間は複製元のトークンから取り除かれる。ノード間で有効期間を受け渡すことで、新たに複製を作れるメッセージの複製はどの時刻をとっても常に 1 つとなる。メッセージの複製転送に伴うライフタイムトーク

ンの委譲動作を擬似コードで図 4.5 に示す。

```
// メッセージを送信するとき、このノードの持つ token から有効期間の前 1/3を
// 取り出してメッセージに付加する
// 自身は token の持つ有効期間の後ろ 2/3を持つ
public void messageSend(Message outgoing)
{
    Token tokenForSender, tokenForReceiver;
    double timeSplit;

    tokenForSender = tokens.get(outgoing.getId());
    timeSplit = (tokenForSender.getTimeEnd() - getTime())/3+ getTime();
    tokenForSender.timeBegin = timeSplit;
    tokenForReceiver = new Token(getTime(), timeSplit);
    outgoing.addProperty('LtD.token', tokenForReceiver);
}

// メッセージを受信したとき、メッセージに付加された token を
// このノードの持つ token とする
public void messageReceive(Message incoming)
{
    Token tokenForReceiver = incoming.getProperty('LtD.token');
    tokens.put(incoming.getId(), tokenForReceiver);
}
```

図 4.5: LtD のメッセージの転送に伴う Lifetime token の委譲

4.3 Lifetime token Delegation 全体の動作

まず、図 4.6 に Lifetime token Delegation のアプローチであるノードの移動性の活用について示す。生成元ノードから複製転送されるメッセージは、ライフタイムトークンの委譲に従って、緩やかに複製の数を増やしながらか宛先への到達を目指す。複製時期の早いメッセージほど長い待ち時間を持つため、よりネットワーク中に拡散することが期待される。ネットワーク中に拡散した複製を持つノードのどれか一つでも宛先とコンタクトすればメッセージは到達する。

4.3. LIFETIME TOKEN DELEGATION 全体の動作

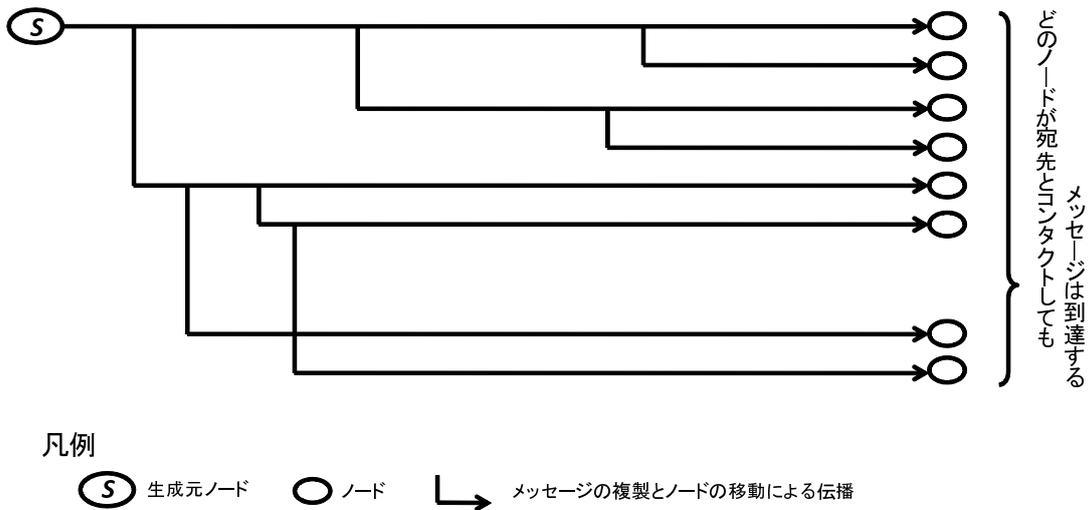


図 4.6: LtD を用いたメッセージ複製転送の模式図

Lifetime token Delegation 全体の動作概要を図 4.7 に示す。

ノード S がメッセージの生成元ノード、ノード D がメッセージの宛先ノード、ノード N_1, N_2, N_3 はそれぞれ宛先でも生成元でもないノードを表す。

時刻 T_0 はメッセージの生成時を表す。メッセージの生成時、現在時刻からメッセージの TTL 終了までの期間を持つトークンがノード S に生成される。

時刻 T_1, T_2, T_3 がそれぞれメッセージの宛先でないノードとのコンタクトを表す。コンタクト時にライフタイムトークンの現在時刻を含む部分から $1/3$ 切り出し、転送先ノードに委譲する。

時刻 T_3 では時刻 T_1 にトークンの有効期限を委譲して、メッセージを複製できない状態であったノード S が、時刻の経過により再びメッセージの複製が可能となる状態を表す。時刻 T_1 から T_3 の間にノード S と他のノードにコンタクトがあったとしても、ノード S がトークンを持たない期間には複製は行われない。

時刻 T_4 ではライフタイムトークンを持たないノード N_2 とメッセージの宛先 D にコンタクトがあった場合を表す。トークンの如何に関わらず、宛先へはメッセージが送信され、メッセージの転送が完了する。

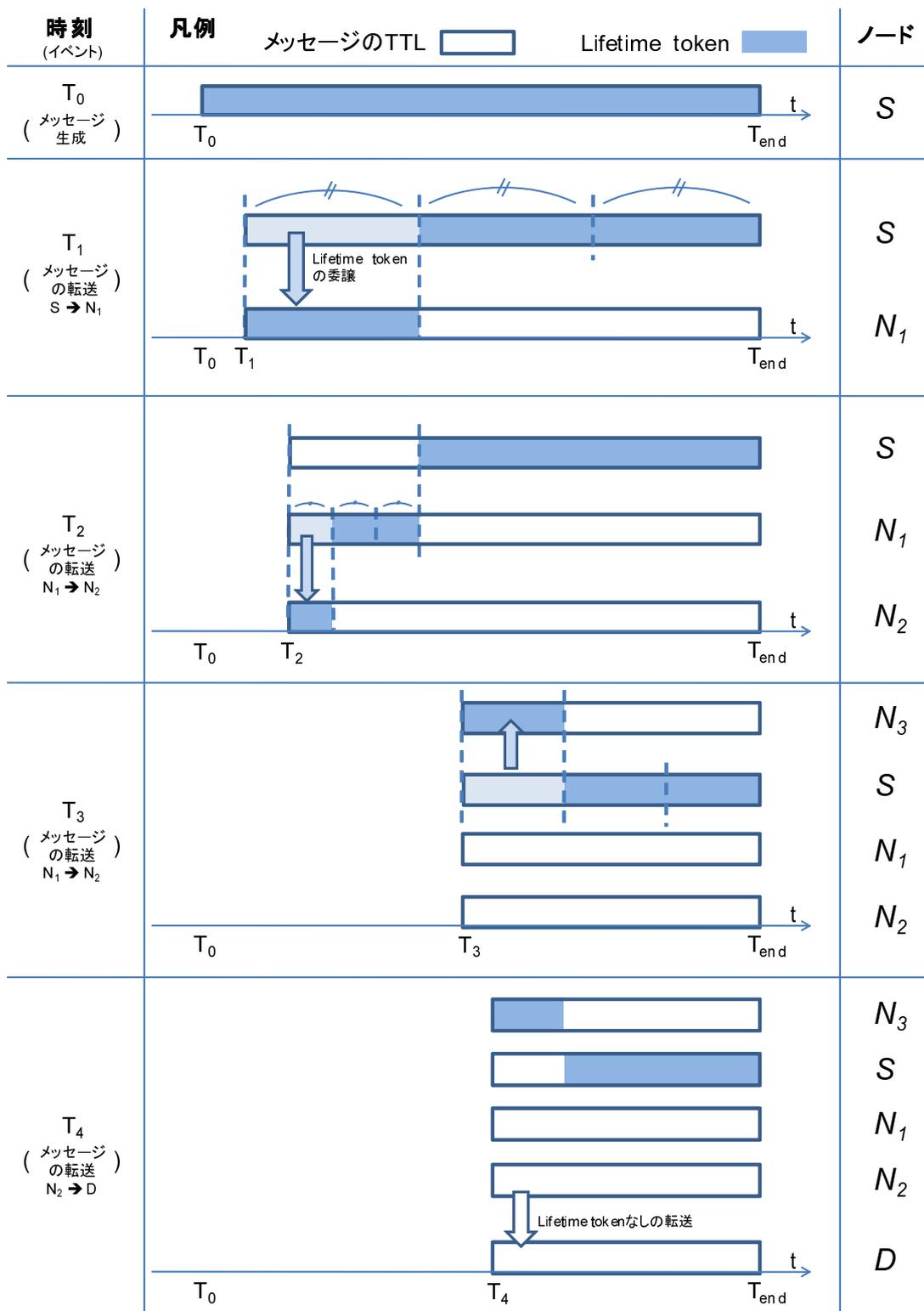


図 4.7: メッセージの転送と Lifetime token の委譲の様式図

4.4 Lifetime token Delegation + P_{Ro}PHET

Lifetime token Delegation(LtD) はライフタイムを活用することで複製の削減を狙う、複製管理の手法である。3.1 節で述べたように、DTN ルーティングは4つの機能から成り立っており複製管理手法のみではDTN ルーティングとして動作し得ない。そこで、提案手法である LtD と、転送先選択機能と転送メッセージの選択機能としての P_{Ro}PHET を組み合わせた新たな DTN ルーティング LtD + P_{Ro}PHET を提案する。P_{Ro}PHET は転送先選択と転送メッセージ選択についてよく知られた手法であることからこれを選んだ。

表 4.1 に LtD + P_{Ro}PHET と第 3 章で述べた既存手法との比較をまとめる。

表 4.1: LtD + P_{Ro}PHET の手法

手法名	転送先の選択 *1	転送メッセージ の選択 *2	破棄メッセージ の選択	複製の管理
LtD + P _{Ro} PHET	GRTRMax	GRTRMax	FIFO	LtD, Ack
Epidemic	なし	FIFO	FIFO	Ack
Spray and Wait	なし	FIFO	FIFO	複製回数の 制限
Spray and Focus	なし, Single-copy Utility-based *3	FIFO *4	FIFO	複製回数の 制限
MaxProp	なし	パスコストと 複製回数による	パスコストと 複製回数による	Ack
P _{Ro} PHET	GRTRMax	GRTRMax	FIFO	Ack

- *1: すべての手法共通で、既にメッセージを持っているノードは転送先から除外する。また、“なし”はすべてのノードをメッセージの転送先として選択することを表す。
- *2: すべての手法共通で、宛先とコンタクトがあるメッセージは最優先される。
- *3: Spray 段階では選択なし、Focus 段階では Single-copy Utility-based となる。
- *4: ただし、Spray 段階のメッセージを優先。

4.5 本章のまとめ

本章では提案手法である Lifetime Delegation Forwarding(LtD) についてその概念と動作について述べた。LtD ではメッセージのライフタイムを複製管理のトークンとして用いることで、メッセージの複製を抑制する全く新たな複製管理手法である。

また、提案手法である LtD を P_{Ro}PHET の転送先選択機能と転送メッセージ選択機能に組み合わせた新たな DTN ルーティング、LtD + P_{Ro}PHET を提案した。

次章では本研究の評価を行い、その結果と考察について述べる。

第5章 評価

本章では本研究の提案手法である Lifetime token Delegation の評価を行う。

5.1 評価方針

1.1 節で述べたように交通システムの通信手段としての DTN 活用のためには DTN ルーティングにおいてメッセージの複製を如何に抑制するかが課題である。本章では第 4 章で提案した Lifetime token Delegation がこの目的を達成しているか評価する。

評価軸としては以下の四点を用いる。

- メッセージの到達率
生成されたメッセージのうち宛先へ到達したメッセージの割合である。
- メッセージの到達所要時間 (平均)
宛先へ到達したメッセージのみについて、生成されてから到達するまでに要した時間の平均である。
- メッセージの転送回数 (平均)
メッセージがノードからノードへ転送された回数の平均である。
- メッセージのストレージ使用量 (平均)
メッセージがストレージに蓄積されていた時間の平均である。

メッセージ到達率と到達所要時間から本手法によるメッセージの到達に及ぼす影響を、メッセージの転送回数とストレージ使用量から本手法がネットワーク資源の使用量に及ぼす影響を評価する。

5.2 評価環境の設定

提案手法の評価のためネットワークシミュレーターを用いた評価環境を構築し、既存手法との比較を行う。

シミュレーションの想定シナリオは、都市部の交通網上へのネットワーク構築である。ノードとして歩行者と車両、路面電車の 3 種類のモビリティモデルを持つノードをシミュレートする。ノード上では DTN ルーティング手法が動作しており、すべてのノードが一定量のストレージと無線によるリンクを備え、ノード同士が無線の通信範囲に入ることによって一定の帯域でノード間でメッセージの送信が行えるものとする。

5.2. 評価環境の設定

5.2.1 シミュレータ

都市部の交通シミュレーションとその上で動作する DTN のシミュレーションに実績があることから、シミュレータとしては The Opportunistic Network Simulator (The ONE) [23] を用いた。

The ONE は DTN 環境におけるルーティング手法の評価のために開発されたシミュレータであり、Java で記述され GPLv3[24] ライセンスの元で公開されているオープンソースソフトウェアである。The ONE はノード移動モデルシミュレータ、トラフィックジェネレータ、ネットワークシミュレータ、ヴィジュアルライザを備えている。

5.2.2 ノードのパラメーターとモビリティシナリオ

シミュレーションするノードのモビリティシナリオには The ONE に付属するマップベースのモビリティシナリオ *Helsinki City Scenario (HCS)* を用いた。

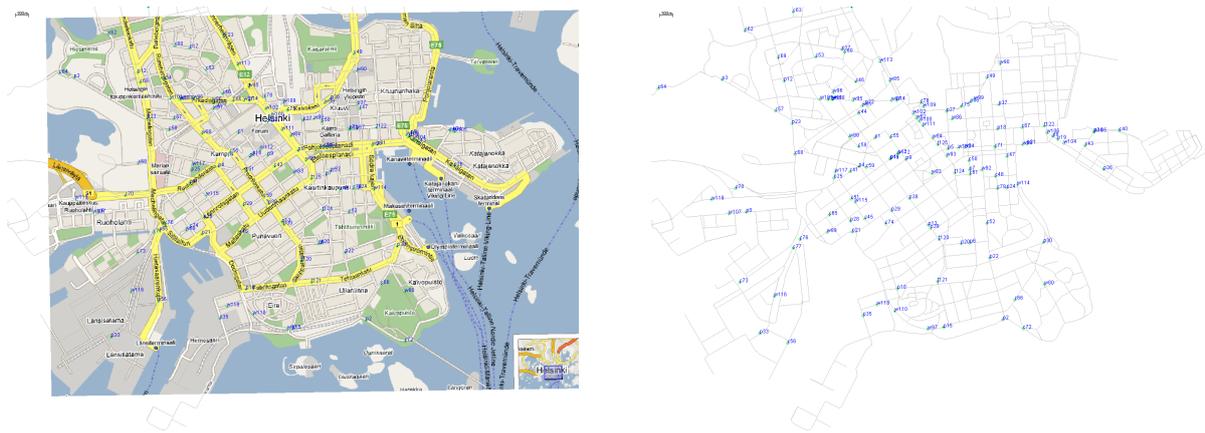


図 5.1: マップ - ヘルシンキ近郊

図 5.1 にマップモビリティモデルの動作するマップを示す。HCS ではマップはヘルシンキ近郊およそ 4km 四方の道路地図を擬えており、歩行者と車両と路面電車それぞれのモビリティに従いノードが移動するシナリオである。

歩行者、車両、路面電車の各ノードは、地図上を目的地へ一定の速度で移動し、目的地で一定時間停止し、再度目的地を選出して移動を開始するという共通のパターンに従い移動する。各ノードの目的地の選出法、移動経路の決定法、移動速度、停止時間は以下の通りである。

歩行者ノードと車両ノードの Shortest Path mobility model[23] に従い移動する。Shortest Path mobility model では、ノードは道路地図上の任意の交差点を目的地として選び最短移動距離となる経路を一定速度で移動し、目的地で一定時間停止する。歩行者ノードは道路地図上の任意の交差点から目的地を選び、車両ノードは道路地図上の幹線道の交差点か

ら目的地を選ぶ。路面電車ノードは道路地図上をあらかじめ決められた経路に沿って一定速度で移動し、決められた停止場所で一定時間停止する。移動速度と停止時間は各ノードに値域が定められており、停止毎に正規分布に従い新たな値が選ばれる。各ノードのパラメータを表 5.1 に示す。

表 5.1: ノードに関するシミュレーションのパラメータ

パラメータ \ 値域	歩行者	車両	路面電車
ノード数 *1	80 (ノード)*2	40 (ノード)*2	6 (ノード)
移動速度	1.8-5.4 (km/h)	10-50 (km/h)	25-36 (km/h)
停止時間	10-120 (sec)	10-120 (sec)	10-30 (sec)
通信可能距離	10 (m)		
通信帯域	16 (Mbps)		
ストレージ容量 *1	10 (MB)		100 (MB) *3

*1: それぞれシミュレーションの変数として扱わない場合の値

*2: 車両の台数は歩行者の数の半分とする

*3: 路面電車搭載ノードのストレージ容量は車両や歩行者のストレージ容量の 10 倍とする

5.2.3 トラフィックシナリオ

シミュレーションではトラフィックのシナリオとして、移動体間の接近通知や交通情報システムやユーザーなどによるメッセージング一般を想定し、ノードからノードへとメッセージが送信される環境を想定する。

トラフィックに関するシミュレーションのパラメータを表 5.2 に示す。メッセージはネットワーク中に一定の生成間隔で発生し、メッセージの生成元、宛先ともにランダムなノードが選ばれるものとする。

表 5.2: トラフィックパラメータ

パラメータ	値域
メッセージ TTL *1	120 (min)
メッセージサイズ	500-1000 (kByte) *2
メッセージ生成間隔 *1	30 (message/sec)

*1: それぞれシミュレーションの変数として扱わない場合の値

*2: メッセージ生成時に正規分布に従い値の範囲でメッセージサイズを決定する

5.3 実験結果

本節では 5.2 節で構築したシミュレーション環境で提案手法と第 3 章で述べた関連研究の手法を動作させ、その結果を示す。

5.3.1 基準パラメータにおける比較

まず、基準としてメッセージの TTL120[min]、ノードの持つストレージ容量 10[MB]、ノード数 126、メッセージの生成間隔 30[message/sec] とした時の各手法の値を表 5.3 に示す。

表 5.3: 基準パラメータにおける各手法の比較

手法名	到達率 [%]	到達所要時間 (平均) [sec]	転送回数 (平均)	ストレージ使用量 (平均) [sec]
LtD + PRoPHET	98.15	2180	9.80	17363
Epidemic	78.23	1486	116.19	46481
Spray and Wait	89.60	1988	5.84	35243
Spray and Focus	66.74	2393	46.48	17978
MaxProp	96.78	1469	187.08	44822
PRoPHET	89.39	1751	51.07	29529

到達率では提案手法である LtD と PRoPHET を組み合わせた LtD + PRoPHET が最も優れた結果であり、次いで MaxProp、Spray and Wait、PRoPHET、Epidemic までが到達率 75%以上を達成した手法であった。

到達所要時間の平均では、MaxProp が最も優れた結果であり、Epidemic、PRoPHET、Spray and Wait、LtD + PRoPHET、と続き、到達率に優れた 5 手法が到達所要時間の平均についても優れた傾向が明らかになった。到達所要時間の平均が最も大きかったのは Spray and Focus で、MaxProp の約 1.5 倍の所要時間である。しかし、Spray and Focus の到達率は 66.74%と最も低く、到達所要時間の平均の算出に用いられたメッセージの数が異なるため、一概に比較はできないことに留意されたい。

転送回数の平均では Spray and Wait が最も少なく、最も多かったのは MaxProp であった。

ストレージ使用量の平均では LtD + PRoPHET が最も少なく、最も多かったのは Epidemic であった。

5.3.2 比較対象

基準パラメータにおける実験結果より、以降は議論を次の 5 手法に絞った評価を行う。

- LtD + P_{Ro}PHET
本研究の提案手法を適用した DTN ルーティングである。
P_{Ro}PHET のパラメータとしては $P_{init} = 0.75$ 、 $\beta = 0.25$ 、 $\gamma = 0.98$ を用いる。
- P_{Ro}PHET
本研究の提案手法による性能変化の評価のため、評価対象に含める。
パラメータは LtD + P_{Ro}PHET のものと同様の値を用いた。
- Epidemic
Epidemic 型ルーティングの祖であり、関連研究でも多く比較対象とされていること、基準パラメータでの到達率では他手法に劣ったものの到達所要時間の点で優秀であったことから比較対象に含める。
- MaxProp
基準パラメータにおける実験で到達所要時間の平均が最も短く、到達率でも優秀であったことから比較対象に含める。
- Spray and Wait
基準パラメータにおける実験でメッセージ複製回数の平均が最も少なく、メッセージの複製を局限する手法として比較対象に含める。
パラメータとして $L = 6$ を用いた。

5.3. 実験結果

5.3.3 ライフタイムをシミュレーションパラメータとした比較

メッセージ生成時のライフタイムをパラメータとした際の各手法の実験の結果を図 5.2 に示す。メッセージの宛先への到達率を図 5.2(a) に、宛先に到達したメッセージについて生成されてから宛先に到達するまでの所要時間の平均を図 5.2(b) に、メッセージが複製や転送によりノード間を移動した回数の平均を図 5.2(c) に、メッセージがノードのストレージに蓄積された時間の平均を図 5.2(d) に示した。

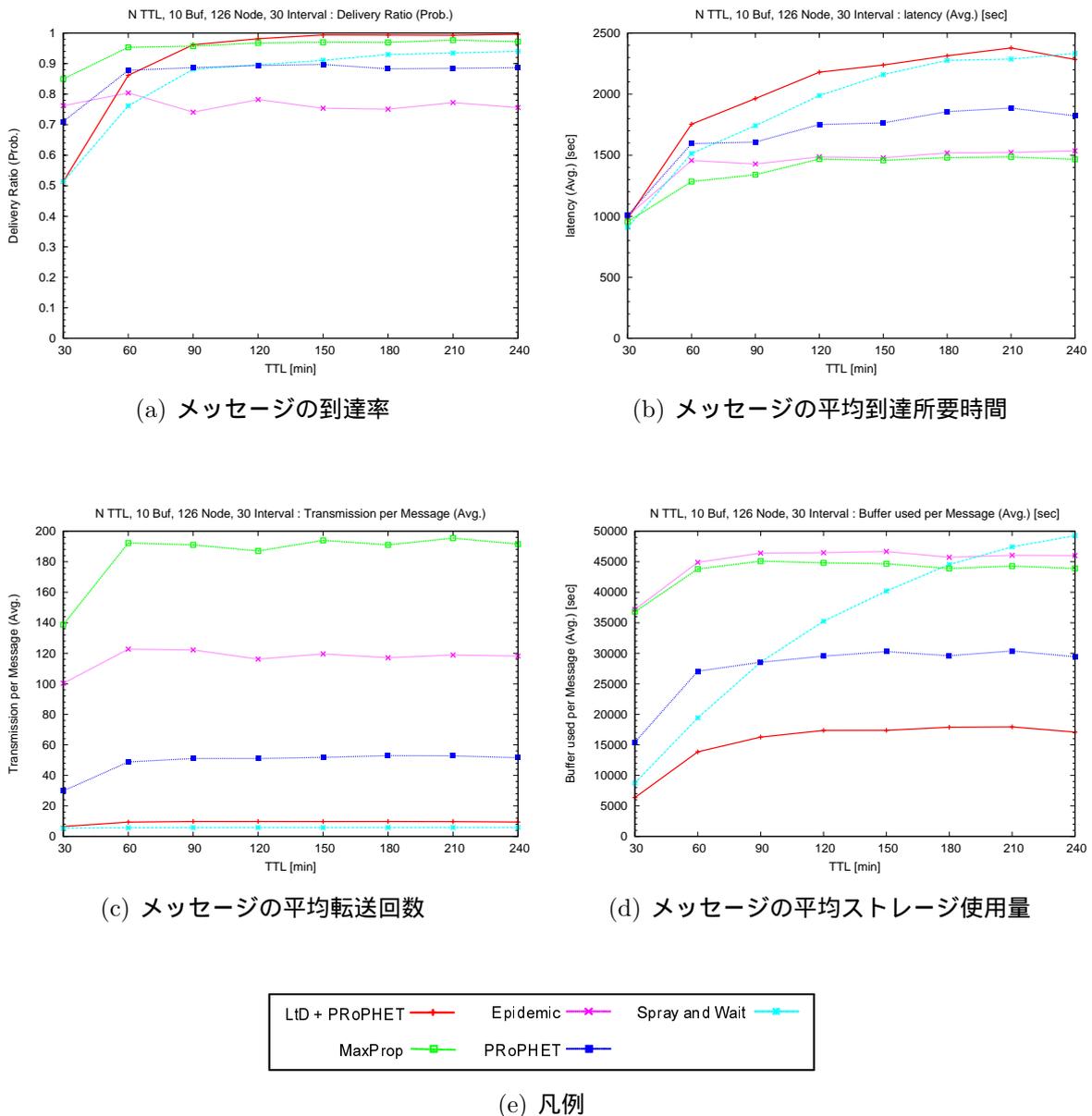
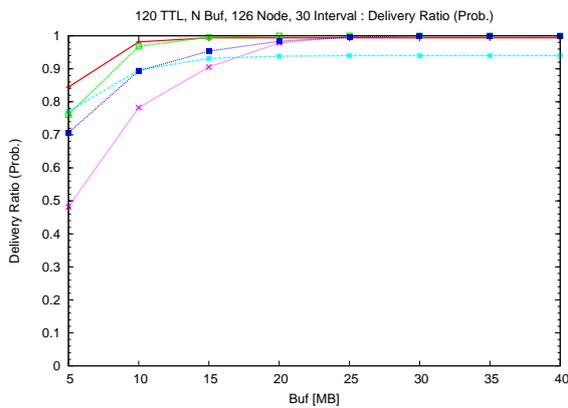


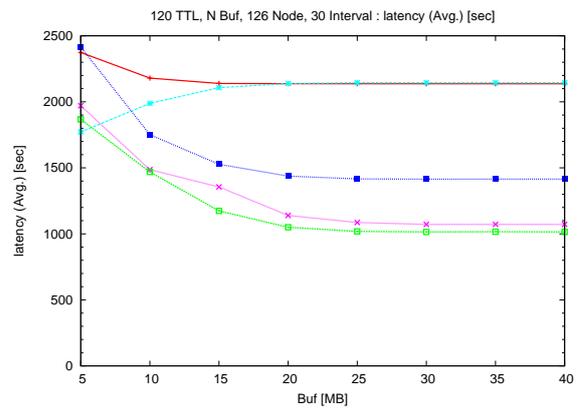
図 5.2: ライフタイムの変化に伴う影響の比較

5.3.4 ストレージ容量をシミュレーションパラメータとした比較

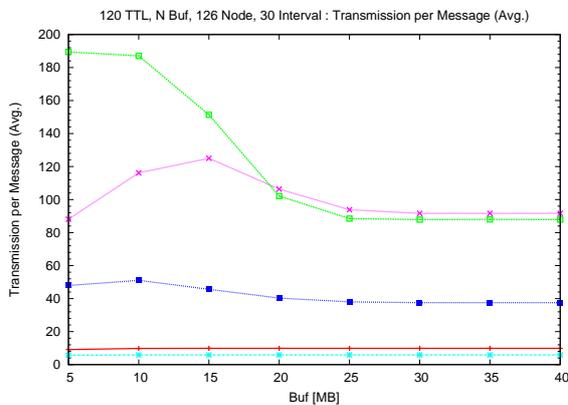
各ノードの持つストレージの容量をパラメータとした際の各手法の実験の結果を図 5.3 に示す。メッセージの宛先への到達率を図 5.3(a) に、宛先に到達したメッセージについて生成されてから宛先に到達するまでの所要時間の平均を図 5.3(b) に、メッセージが複製や転送によりノード間を移動した回数の平均を図 5.3(c) に、メッセージがノードのストレージに蓄積された時間の平均を図 5.3(d) に示した。



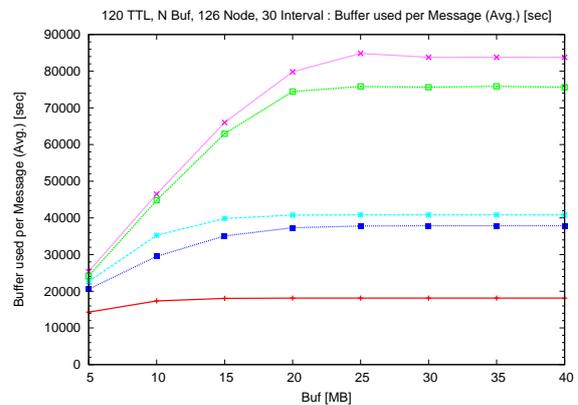
(a) メッセージの到達率



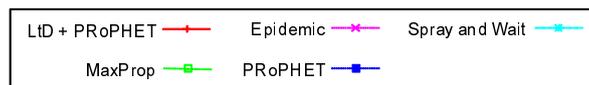
(b) メッセージの平均到達所要時間



(c) メッセージの平均転送回数



(d) メッセージの平均ストレージ使用量



(e) 凡例

図 5.3: ストレージ容量の変化に伴う影響の比較

5.3. 実験結果

5.3.5 ノードの数をシミュレーションパラメータとした比較

ノード数をパラメータとした際の各手法の実験の結果を図 5.4 に示す。メッセージの宛先への到達率を図 5.4(a) に、宛先に到達したメッセージについて生成されてから宛先に到達するまでの所要時間の平均を図 5.4(b) に、メッセージが複製や転送によりノード間を移動した回数の平均を図 5.4(c) に、メッセージがノードのストレージに蓄積された時間の平均を図 5.4(d) に示した。

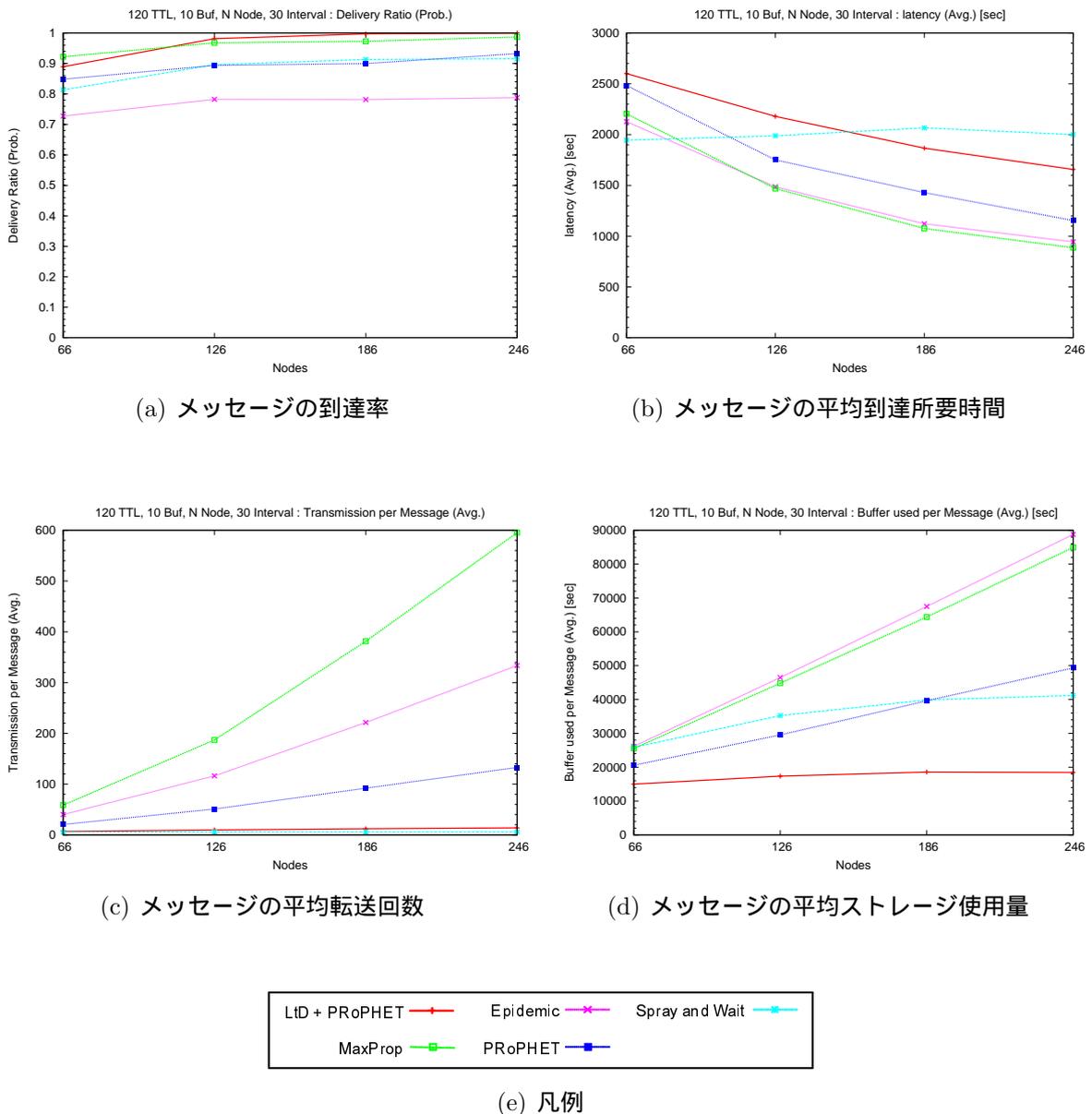
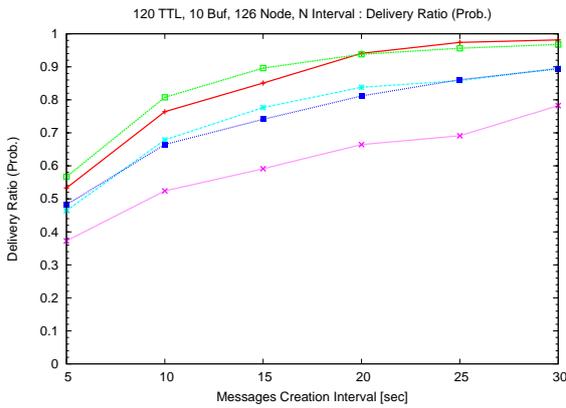


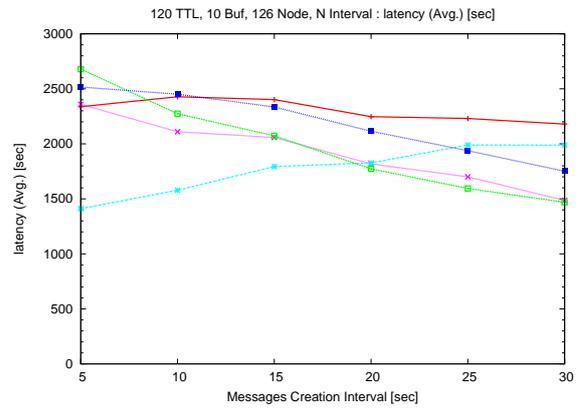
図 5.4: ノード数の変化に伴う影響の比較

5.3.6 メッセージ発生間隔をシミュレーションパラメータとした比較

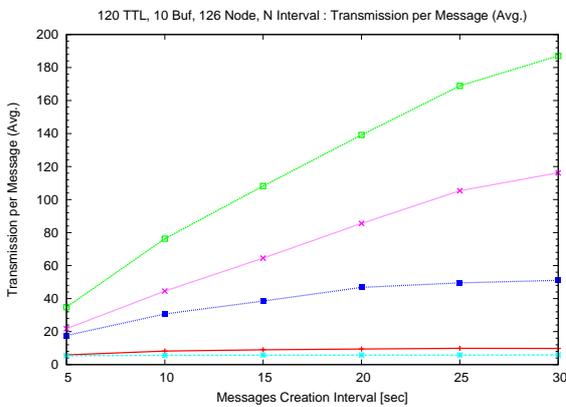
ネットワーク全体におけるメッセージの発生間隔をパラメータとした際の各手法の実験の結果を図 5.5 に示す。メッセージの宛先への到達率を図 5.5(a) に、宛先に到達したメッセージについて生成されてから宛先に到達するまでの所要時間の平均を図 5.5(b) に、メッセージが複製や転送によりノード間を移動した回数の平均を図 5.5(c) に、メッセージがノードのストレージに蓄積された時間の平均を図 5.5(d) に示した。



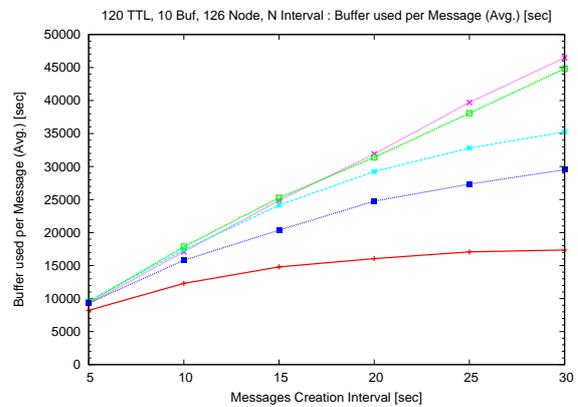
(a) メッセージの到達率



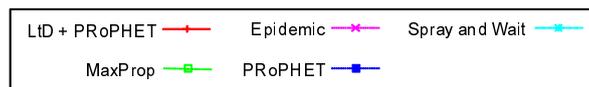
(b) メッセージの平均到達所要時間



(c) メッセージの平均転送回数



(d) メッセージの平均ストレージ使用量



(e) 凡例

図 5.5: メッセージの発生間隔の変化に伴う影響の比較

5.4 シミュレーション結果の考察

以上のシミュレーション結果より評価軸について考察を行う。

- メッセージの到達率 について
図 5.2(a), 図 5.3(a), 図 5.4(a) から見て取れるように $TTL < 120min$ の場合 LtD はメッセージの到達率が MaxProp と比べて大きく下がる、これは図 5.3(b), 図 5.4(b) などが示すように LtD はメッセージの宛先への到達所要時間が MaxProp と比べて大きいいため宛先に到達する以前にメッセージのライフタイムが切れるためと思われる。 $TTL < 120min$ の場合を除いては、LtD は MaxProp と同程度の高いメッセージ到達率を達成している。
- メッセージの到達所要時間 について
図 5.2(b), 図 5.3(b), 図 5.4(b) から見て取れるように LtD ではメッセージの到達に MaxProp のおおよそ 2 倍程度時間が必要である。しかし Epidemic, PProPHET, Spray and Wait と比較すれば同程度の所要時間である。
- メッセージの転送回数 について
図 5.2(c), 図 5.3(c), 図 5.4(c) から LtD ではメッセージの転送回数が低く抑えられていることがわかる。
- メッセージのストレージ使用量 図 5.2(d), 図 5.3(d), 図 5.4(d) から LtD ではストレージの使用量が比較したどの手法よりも低く抑えられていることがわかる。

図 5.2(a), 図 5.3(a), 図 5.4(a) から見て取れるように $TTL < 120min$ の場合を除いて、LtD は MaxProp と同程度のメッセージ到達率を達成している。 $TTL < 120min$ の場合 LtD はメッセージの到達率が MaxProp と比べて大きく下がる、これは図 5.3(b), 図 5.4(b) などが示すように LtD はメッセージの宛先への到達所要時間が MaxProp と比べて大きいいため宛先に到達する以前にメッセージのライフタイムが切れるためと思われる。

図 5.2(c), 図 5.3(c), 図 5.4(c) が示すように LtD ではメッセージの転送回数が低く抑えられている。、図 5.2(d), 図 5.3(d), 図 5.4(d) からはストレージの使用量についても LtD は低く抑えられていることがわかる。

5.5 本章のまとめ

本章では本研究の提案手法である Lifetime token Delegation(LtD) の評価を行った。評価結果より、LtD はメッセージの複製回数を大きく削減し、ストレージ使用量も小さいことが明らかになった。LtD はメッセージの宛先への到達所要時間は比較した手法の中で平均的であり、メッセージの転送成功率について優れていることがわかった。

次章では本論文をまとめ、今後の課題について述べる。

第6章 結論

本章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 本研究のまとめ

本研究ではDTNにおけるメッセージであるメッセージの持つライフタイムに着目し、ライフタイムを複製管理のトークンとして用いることで、過剰な複製を抑制する複製管理手法 Lifetime token Delegation(LtD) を提案した。LtDは、メッセージの複製転送だけでなく移動性も活用してメッセージを到達させる手法である。ノードの移動性活用のためメッセージをストレージに蓄積し、転送を行わずに一定時間待機させることで、複製回数やストレージ使用量の削減と到達率の両立を。

また、提案手法を、交通情報システムを模したDTN評価用のシミュレーション上で評価した。既存手法との比較の中でも、宛先へのメッセージ到達率に優れることが知られた手法である MaxProp と比較して、到達率について提案手法が MaxProp とほぼ同じに保った上で、複製回数を 1/20 まで削減、ストレージの使用量を 40% まで削減するなど、既存手法に対してと大きくネットワーク資源の使用量の面で優れることを確認した。

6.2 今後の課題と展望

本節では、本研究の今後の課題と展望として以下の事項を挙げる。

6.2.1 転送先選択と転送メッセージ選択手法に関する研究

本研究ではDTNルーティングの一機能であるメッセージ複製管理手法としてLtDを提案し、転送先の選択と転送メッセージの選択機能としてPRoPHETと組み合わせて用いて評価を行った。PRoPHETはDTNルーティングの分野ではよく知られた手法であるが、交通情報システムの分野では車両の位置情報や速度などを用いたルーティング手法も研究されており、それらのネクストホップ選択手法とLtDを組み合わせることでより洗練されたルーティング手法を提案できる可能性があり、今後はそのような研究を進める必要がある。

6.2.2 Lifetime token の分割/委譲手法の改良

本研究では Lifetime token をノードからノードに委譲する際に、移譲先ノードの如何に関わらず委譲元ノードの持つトークンの前半 1/3 の長さで委譲を行った。しかし、メッセージの送信元ノードから宛先ノードへ至るのに必要なホップ数が大きいとき、Lifetime token が分割されすぎ必要な長さが残らないという状況が想定できる。

移譲先ノードと情報交換を行い、委譲するトークンの長さを動的に変更できるようにするなどのトークン分割/委譲手法について研究を行う必要がある。

6.2.3 より実環境に近いシミュレーションシナリオの検討

本研究では都市の交通システムを模したシミュレーションにより提案手法の評価を行った。しかしシミュレーションシナリオではわずかノードが移動可能なのはわずか 4km 四方の領域のみであり、たとえば外部からシミュレーションに新たなノードが参入したり逆に離脱したりという現実の交通システムで起こりうる事象のすべては網羅していない。また、トラフィックのモデルでもランダムなノードからランダムなノードへのメッセージ送信だけでなく情報発信/受信のハブとなるノードが存在した場合なども考慮されていない。

DTN の分野でそのような込み入ったシナリオのシミュレーションは一般的ではなく、そのような要因を考慮した際どれだけ評価結果に与える影響があるのかも知られていない。しかし、より実際的な手法を構築するためには評価環境もより実際的に成らざるを得ず、そのような要因を考慮したシミュレーションシナリオについて検討を行わなければならない。

参考文献

- [1] Kevin Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. pages 27–34, 2003. [1.1](#), [2.1](#)
- [2] Vinton G. Cerf, Scott C. Burleigh, Robert C. Durst, Kevin Fall, Adrian J. Hooke, Keith L. Scott, Leigh Torgerson, and Howard S. Weiss. Delay-tolerant networking architecture (rfc 4838), April 2007. [1.1](#), [2.1](#)
- [3] K. Scott and S. Burleigh. Bundle protocol specification (rfc 5050), November 2007. [1.1](#), [2.1](#)
- [4] A. Tutorial. Delay-Tolerant Networks (DTNs). [2.1](#)
- [5] Zhensheng Zhang. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 8(1):24–37, 2006. [2.2](#)
- [6] Scott Burleigh. *Interplanetary Overlay Network (ION) Design and Operation*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, v1.8 edition, February 2008. [2.2.1](#)
- [7] S. Burleigh. Dynamic routing for delay-tolerant networking in space flight operations. *SpaceOps 2008, AIAA 2008*, 3406, 2008. [2.2.1](#)
- [8] Sushant Jain, Kevin Fall, and Rabin Patra. Routing in a delay tolerant network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34(4):145–158, 2004. [2.2.1](#)
- [9] C. Becker and G. Schiele. New mechanisms for routing in ad hoc networks through world models. In *Proceedings of the 4th CyberNet Plenary Workshop, Pisa, Italy*, 2001. [2.2.2](#)
- [10] A. Vahdat and D. Becker. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. *Technical report, Duke University*, 2000. [2.2.3](#), [3.2.1](#)
- [11] J. Burgess, J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In B. Gallagher, editor, *Proc. 25th IEEE International Conference on Computer Communications INFOCOM 2006*, pages 1–11, 2006. [2.2.3](#), [3.2.4](#)

- [12] Aruna Balasubramanian, Brian Neil Levine, and Arun Venkataramani. Dtn routing as a resource allocation problem. In *ACM SIGCOMM2007*, 2007. [2.2.4](#)
- [13] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 239–254, 2004. [2.2.4](#), [3.2.5](#)
- [14] Hideya Ochiai and Hiroshi Esaki. Mobility entropy and message routing in community-structured delay tolerant networks. 2008. [2.2.4](#)
- [15] Y. Wang, S. Jain, M. Martonosi, and K. Fall. Erasure-coding based routing for opportunistic networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, page 236. ACM, 2005. [2.2.5](#), [2.3](#)
- [16] B. Burns, O. Brock, and B.N. Levine. MV routing and capacity building in disruption tolerant networks. In *IEEE infocom*, volume 1, page 398. Citeseer, 2005. [2.2.6](#)
- [17] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 187–198. ACM New York, NY, USA, 2004. [2.2.6](#)
- [18] Z. Da Chen, HT Kung, and D. Vlah. Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 247–250. ACM New York, NY, USA, 2001. [2.3](#)
- [19] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, page 259. ACM, 2005. [3.2.2](#)
- [20] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pages 79–85. Citeseer, 2007. [3.2.3](#)
- [21] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(1):63–76, 2008. [3.2.3](#)
- [22] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, and S. Grasic. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks. *draft-irtf-dtnrg-prophet-04*, November 2009. [3.2.5](#)

- [23] Ari Keränen, Jörg Ott, and Teemu Kärkkäinen. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, New York, NY, USA, 2009. ICST. [5.2.1](#), [5.2.2](#)
- [24] Free Software Foundation. Gnu general public license, Junu 2007. [5.2.1](#)

謝辞

本論文の作成にあたり、御助言をいただきました慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士、同学部教授中村修博士、同学部准教授楠本博之博士、同学部専任講師重近範行博士、同学部専任講師 Rodney D. Van Meter III 博士、同学部准教授三次仁博士、同学部教授武田圭史博士に感謝します。

また常にご指導をいただきました、環境情報学部准教授植原啓介博士、政策・メディア研究科特別研究講師佐藤雅明博士に感謝します。

身近な先輩として御助言頂きました政策・メディア研究科博士課程岡田耕司氏、田崎創氏に感謝します。本論文における提案の核となるアイディアは岡田耕司氏とのやりとりの間に生まれました、重ねて感謝いたします。

学部入学当初、右も左もわからなかった自分にルーティングという分野への興味を持たせてくださった北陸先端科学技術大学院大学情報科学センター助教小原泰弘氏に感謝します。

学部2年の頃、研究テーマに悩んでいた自分にDTNという分野を紹介してくださったシスコシステムズ小椋康平氏に感謝します。

学部3年の頃、勉強不足だった自分にDTN勉強会の開催を勧め、また参加してくださった東京大学大学院総合文化研究科助教石原知洋氏、政策・メディア研究科特別研究助教鈴木茂哉氏に感謝します。

身近な人々として何かと気をかけてくださった政策・メディア研究科博士課程松谷健史氏、六田佳祐氏、黒宮佑介氏、三部剛義氏、中村寮氏に感謝します。

遅々として執筆の進まぬ自分を生暖かい眼差しで見守ってくださった政策・メディア研究科博士課程水谷正慶氏、空閑洋平氏に感謝します。

卒業論文執筆で苦楽を共にした、上原雄貴氏、永山翔太氏、佐藤貴彦氏、勝利友香氏に感謝します。

iCAR研究グループの鶴飼佑氏、澤田暖氏、梶原浩紀氏、Do Thi Thuy Van氏、村上滋希氏、黒濱達也氏に感謝します。

そして、徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤・武田合同研究プロジェクトの諸氏皆々様に感謝致します。

以上を持って謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。