

修士論文 2011年度(平成23年)

車車間通信を想定した
遅延・分断耐性ネットワークにおける
メッセージ配送機構

慶応義塾大学 政策・メディア研究科

波多野 敏明

車車間通信を想定した遅延・分断耐性ネットワークにおける メッセージ配送機構

本研究では、車車間通信を想定した遅延・分断耐性ネットワークのメッセージ配送機構について扱う。車車間通信は、Intelligent Transport Systems (ITS) の分野で研究されており、接近通知による衝突回避や車両自身が交通情報を生成・伝播・集約するセンタレスプローブ情報システムなどのアプリケーションが考えられている。車車間通信環境上へのネットワーク構築には、車両の移動性と無線通信範囲の制約から通信可能な機会が限られることにより発生する困難さがつきまとう。偶発的に発生する通信機会を捉えて通信を行わなければならない、ネットワークに特定のトポロジを見いだすことは困難であり、また、メッセージが中継に適した通信機会を待たねばならないため大きな遅延が発生する。

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、遅延・分断耐性ネットワーク (DTN: Delay- and Disruption- Tolerant Networking) のアーキテクチャが提案されている。DTN アーキテクチャの遅延や分断に強い特性を車車間通信のメッセージ配送機構として活用を考えた場合、多くある DTN のルーティング手法の提案の中でどの手法が車車間通信の現実的なシナリオにおいて適しているかは明らかでない。また、通信環境の変化がパフォーマンスに与える影響についても不明である。

本研究では平成 14 年度 ITS 名古屋実証実験より得られた実環境での車両運行データを元に、車車間通信環境をシミュレートし、DTN ルーティングの性能評価を行った。評価の結果、PRoPHET ルーティングがメッセージの到達所要時間やネットワークリソース消費の観点から優れ、車車間通信を想定した DTN のルーティング手法として適していることが明らかになった。

キーワード

1. 遅延・分断耐性ネットワーク, 2. 車車間通信, 3. ルーティング, 4. 日和見型ネットワーク

Design and Evaluation of a DTN message distribution mechanism for V2V communication

In this thesis, I evaluate the performance of DTN as a backend for Vehicle to Vehicle(V2V) Communications. V2V communications are studied in the context of Intelligent Transport System (ITS), for various applications such as proximity warning systems (pre-crash safety), traffic information system and floating car data systems. In V2V communications, as vehicles move around, the network architecture must support rapid and complex changes of the network topology due to intermittent connectivity.

Recently, a new architecture known as Delay- and Disruption- Tolerant Networking (DTN) has been proposed. The DTN architecture takes intermittent connectivity and network into account; every node has its own storage and relay capability, 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 to V2V communications to solve its difficulties.

Many DTN routing schemes have been proposed, but their performance in feasible V2V communication scenario are not known. In this thesis, I simulate feasible V2V communication scenario by using real car trace from ITS experiments conducting in Nagoya in 2002, and evaluate DTN routing performance.

Keywords :

1 . Delay- and Disruption- Tolerant Networking, 2 Routing, 3. V2V Communication,
4. Mobile Opportunistic Network

Keio University , Faculty of Environment and Information Study

Toshiaki HATANO

目次

圖目次

表目次

第 1 章

はじめに

1.1 研究の概要

本研究では、車車間通信を想定した遅延・分断耐性ネットワークのメッセージ配送機構について扱う。車車間通信は、Intelligent Transport Systems(ITS) の分野で研究されており、接近通知による衝突回避や車両自身が交通情報を生成・伝播・集約するセンタレスプローブ情報システム (Center Less Probe: CLP) などのアプリケーションが考えられている。車車間通信環境上へのネットワーク構築には、車両の移動性と無線通信範囲の制約から通信可能な機会が限られることにより発生する困難さがつきまとう。偶発的に発生する通信機会を捉えて通信を行わなければならない、ネットワークに特定のトポロジを見いだすことは困難であり、また、メッセージが中継に適した通信機会を待たねばならないため大きな遅延が発生する。

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、遅延・分断耐性ネットワーク (DTN: Delay- and Disruption- Tolerant Networking) のアーキテクチャが提案されている。DTN アーキテクチャの遅延や分断に強い特性を車車間通信のメッセージ配送機構として活用を考えた場合、多くある DTN のルーティング手法の提案の中でどの手法が車車間通信の現実的なシナリオにおいて適しているかは明らかでない。また、通信環境の変化がパフォーマンスに与える影響についても不明である。

本研究では平成 14 年度 ITS 名古屋実証実験より得られた実環境での車両運行データを元に、車車間通信環境をシミュレートし、DTN ルーティングの性能評価を行う。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は全7章からなる。第1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2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3章では、2002年度に名古屋市で行われたインターネットITS実験実証実験より得られた実車両の緯度経度時刻情報よりコンタクトトレースを生成した、データセットについて述べる。車車間通信を背景とするDTN環境の特徴について明らかにする。第4章では車車間通信を背景とするDTN環境におけるメッセージ配送機構の要件を整理する。第5章では第3章で述べたデータセットを元にシミュレーションを行、車車間通信を背景とする遅延・分断耐性ネットワークにおけるメッセージ配送のパフォーマンスについて考察を行う。

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、Mobile Opportunistic Network に関して 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 [?, ?, ?] 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 [?]. DTN の扱う問題を図??に示す。

- 図??(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??(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??(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??(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。

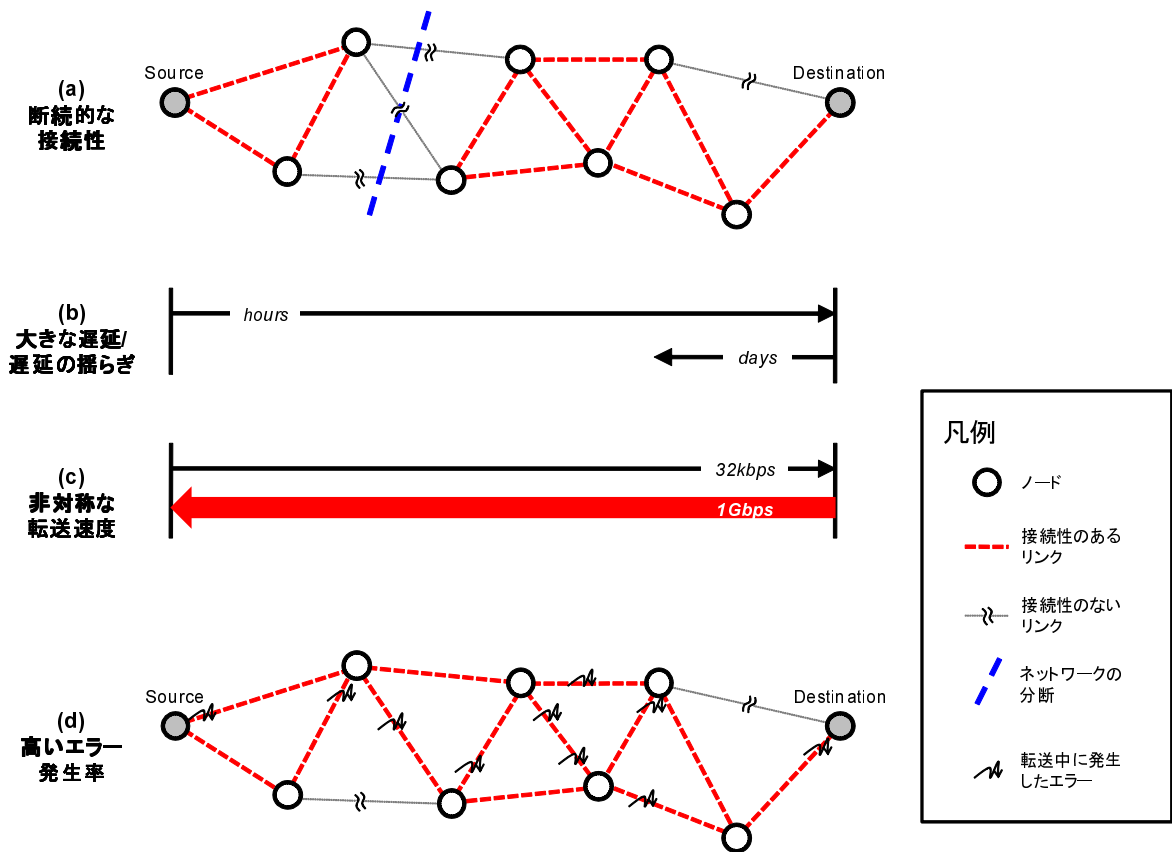


図 2.1: DTN の扱う 4 つの問題

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??に示す。

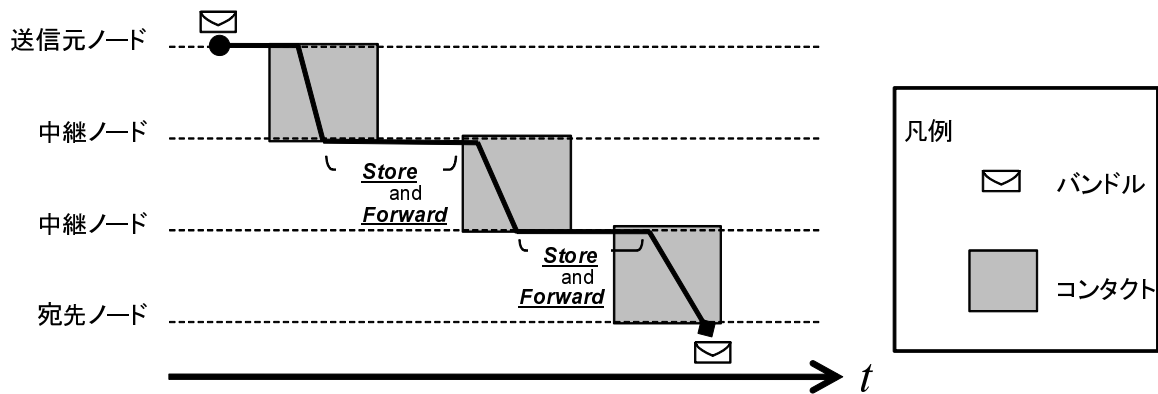


図 2.2: ストア・アンド・フォワード方式による転送

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??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??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

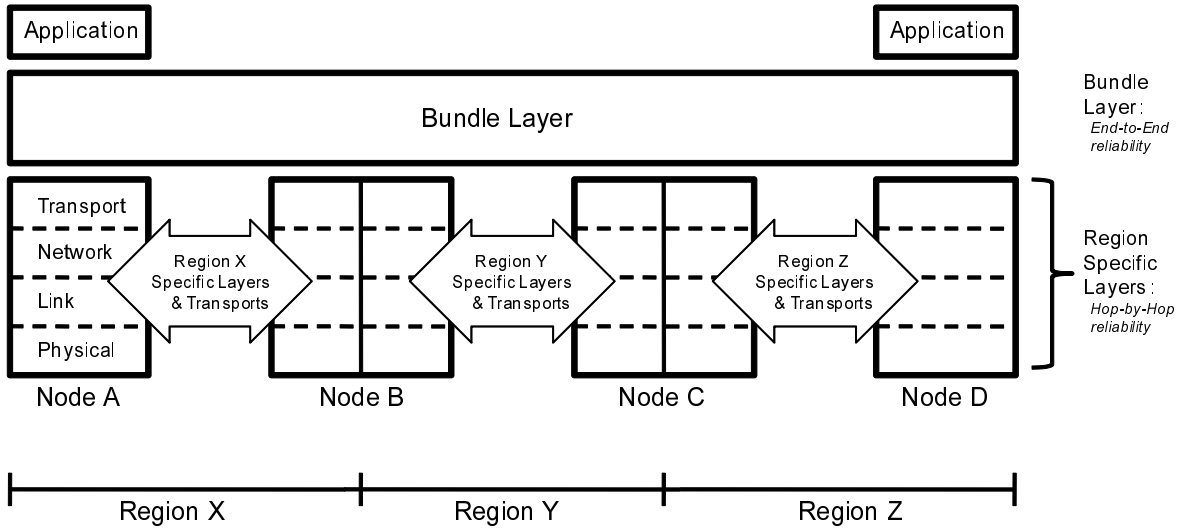


図 2.3: バンドル層のモデル

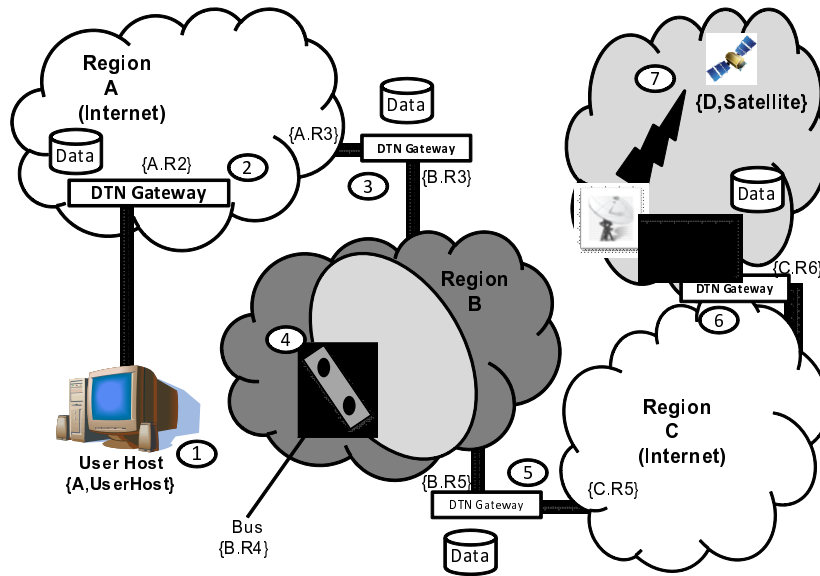


図 2.4: リージョンと DTN ゲートウェイ

ド間ではメッセージ指向の通信モデルが提供される。

2.2 DTN ノードのモデル

2.3 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、Zhang らの研究 [?] によれば、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の観点から Oracle, Model-based, Epidemic, Estimation, Coding, Node Movement の六種類に分類することができる。

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。

2.3.1 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) [?] のルーティング手法である Contact Graph Routing [?] 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 Linear Programming (LP) [?] も提案されている。

2.3.2 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 [?] がある。

2.3.3 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[?] や MaxProp[?] などがある。Epidemic 型の手法の詳細については??節で述べる。

2.3.4 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[?] や PRoPHET[?] や PEAR[?] がある。Estimation 型の手法の詳細については??節で述べる。

2.3.5 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 [?] 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。

2.3.6 Node Movement 型

Node Movement 型の手法は無人探査ロボットの間通信などを想定し、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[?] や Ferry Initiated Message Ferry[?] がある。

2.4 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 [?] 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 [?] 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。

2.5 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??節での考察に基づき、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、??節で取り上げた Epidemic 型と??節で取り上げた Estimation 型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[?] 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[?] 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[?] 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[?]が、本論文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[?] 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、ノードとコンタクト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 はノードの過去のコンタクト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 は過去のコンタクト履歴に基づき求められる。

th の計算手順は次の通り。各ノードは過去のコンタクトの平均帯域 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 の中でのすべてのノード $j \in s$ 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 とコンタクトしたとき f_j^i の値は 1 加算され、 f_j^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[?] 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 [?] が、本論文中では 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 P_{Ro}PHET における Ack について規定した文章がある [?] 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

??章に述べた既存研究の概要より、各手法の比較を表??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
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。

3.4 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。

第4章

平成14年インターネットITS実験 のデータについて

本章では、慶應義塾大学インターネットITS共同研究グループが平成14年度(2002年度)に名古屋市で行ったインターネットITS実証実験(以下H14名古屋実験)の際に得られたデータを車車間通信環境上のDTN構築を想定して解析し、車両をモビリティに想定したDTN環境の特徴について明らかにする。

4.1 実験趣旨

平成14年度、インターネットITS共同研究グループは、総務省支援のもと、慶應義塾大学SFC研究所を中心としたトヨタ自動車株式会社、株式会社デンソー、日本電気株式会社の4社共同研究体制で、ITS基盤の構築によるITS分野の産業育成を目的としたプロジェクトを行った。H14名古屋実験は、同研究グループがインターネットITSのコンセプトおよび基盤仕様を実証し、技術的課題と事業化の可能性を検討し、また同研究グループのプロジェクトを広く情報発信するために行った大規模実証実験である。同研究グループはインターネットITS基盤を名古屋地域に構築し、名古屋市タクシー協会加盟32社、合計1,570台のタクシー車両の協力により、タクシー事業者、利用客を主なユーザと想定したサービスを実証するために、実車走行実験を実施した。

4.1.1 H14 名古屋実験データの概説

タクシーからセンターに送信される情報は、車両位置 (GPS)、車速、加減速度、積算走行距離、ワイパー ON/OFF、タクシー動態 (実/空車)。車載器から携帯電話網を通じてセンターへと情報を送信し、センターにて情報を蓄積したものである。表??に示すイベント発生毎に蓄積した。

表 4.1: 車両からの情報発信イベント

イベント	内容	備考
走行距離間隔	走行距離感覚: 300m	あるイベント発生後、他にイベントが発生しない場合 300m 毎に送信
一定時間間隔	一定時間間隔: 550sec	あるイベント発生後、他にイベントが発生しない場合 550sec 毎に送信
Short Stop*1 終了	発進判断速度: 7km/h 継続時間: 3sec	一定速度以上に加速し、それが一定時間以上継続した場合、Short Stop が終了したと判断する
Short Trip*2 終了	停止判断速度: 3km/h 継続時間: 3sec	一定速度以下に減速し、それが一定時間以上継続した場合、Short Trip が終了したと判断する
実/空車状態変化	タクシーの乗車/降車 の変化時	

*1: Short Stop は車両が停止している状態である。車両の速度 3km/h 以下の状態が 3 秒以上継続した場合 Short Stop 状態開始と判断した

*2: Short Trip は車両が走行している状態である。車両の速度 7km/h 以上の状態が 3 秒以上継続した場合 Short Trip 状態開始と判断した

4.2 DTN コンタクトトレースの生成

H14 名古屋実験の結果得られた車両走行情報は、最大 550 秒の間隔で記録される緯度経度情報であり、そのままでは DTN のコンタクトトレースとして利用することができない。そこで、車両の走行記録である点間を線形に保管することで DTN のコンタクト情報

を生成した。

計算の簡単のため、車両 1,2 ともに開始時刻 T_s から終了時刻 T_e の間は等速直線運動で近似する。車両 1 と車両 2 の時刻 T_s における相対位置ベクトルを S_0 、相対速度を V としたとき、時刻 $T_s \leq t < T_e$ の相対位置ベクトル $S(t)$ は式??と表すことができる。

$$S(t) = S_0 + V * t \quad (4.1)$$

車両 1 と車両 2 の間の通信可能距離 k が時刻によって変化せず一定であるとする、式??を満たす t の間がコンタクトである。

$$\|S(t)\| = k \quad (4.2)$$

式??を両辺 2 乗して、 t に関して解くと式??を得る。

$$\begin{aligned} \|S(t)\|^2 &= k^2 \\ \Leftrightarrow \|S(t)\|^2 - k^2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \|S_0\|^2 - 2 \cdot \|S_0\| \cdot \|V\| \cdot t + \|V\|^2 \cdot t^2 - k^2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \|V\|^2 \cdot t^2 - 2 \cdot \|S_0\| \cdot \|V\| \cdot t + \|S_0\|^2 - k^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで、 $A = \|V\|^2$ 、 $B = -2 \cdot \|S_0\| \cdot \|V\|$ 、 $c = \|S_0\|^2$ と置くと、通信可能距離が k のとき時間 $[T_s, T_e]$ 間で車両 1,2 が通信可能な時間 $[t_1, t_2]$ は二次方程式の解の公式より式??のように求められる。

$$(t_1, t_2) = \frac{-B \mp \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot (c - k^2)}}{2 \cdot A} \quad (4.4)$$

4.3 名古屋データセットの特徴

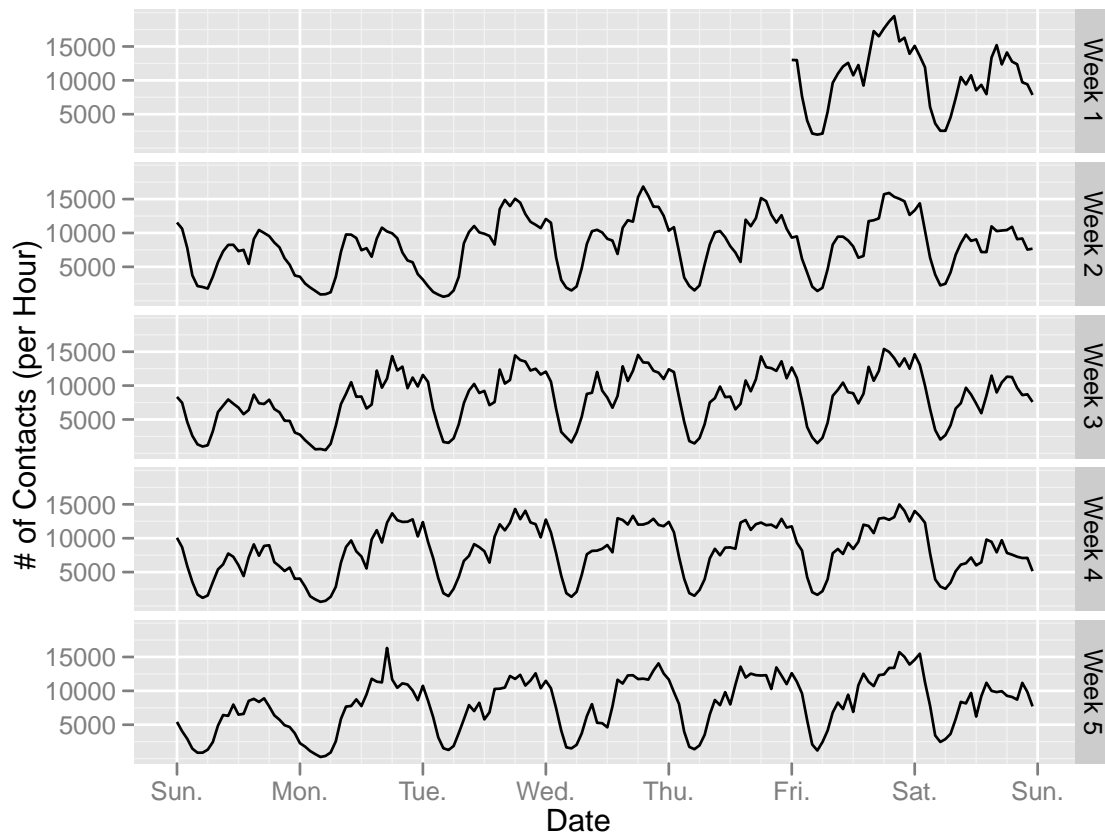
名古屋データセットの特徴を明らかにする。対象期間は 2002 年 11 月 01 日 ~ 2002 年 11 月 30 日の 30 日間、当該期間の総車両台数は 635 台 (201295 ペア) である。

ここではデータセットの解析として、時間あたりの総コンタクト回数、ペア毎総コンタクト回数、ペア毎のコンタクト間隔の平均を調べた。コンタクト算出には??節に述べた方法を用いた。通信可能距離は 10m、100m、1000m の 3 パターンについて解析を行った。この通信可能距離はそれぞれ、Bluetooth などの無線 PAN 技術による車車間通信の想定 (10m)、Wi-Fi などの無線 LAN 技術による車車間通信の想定 (100m)、700MHz 帯高度道路交通システムなどの車車間通信専用の無線技術の想定 (1000m) となっている。

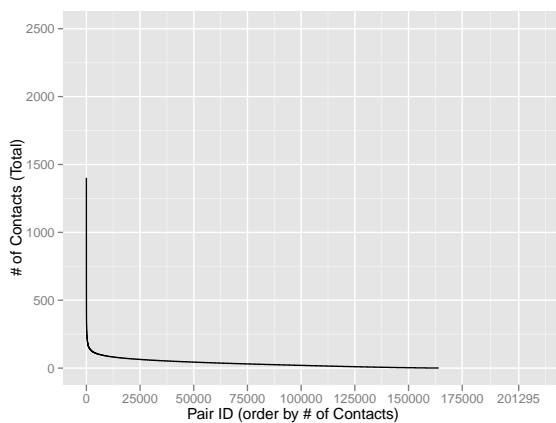
まず、図??に時間あたりの総コンタクト回数の変化を示す。図からはコンタクト数に1日単位の周期性と7日単位の周期性が認められることがわかる。時間あたりの総コンタクト回数が多い場合、一般的に当該時間にメッセージが複製され伝達される機会を得やすいと言える。コンタクト回数の1日単位の周期性を見ると、09-12時頃の第一の山があり、13-15時頃に一度コンタクト回数が少なくなり、16-24時頃に最大となって、以後減少し03-06時頃に最小となる。また、7日単位の周期性を見ると、土曜日と日曜日は平日に比べてコンタクト回数が総じて少ない傾向にある。また、金曜日はコンタクト回数最大となる時刻が平日の中でも遅い(22-24時頃)傾向があり、その時刻が週間最大コンタクト回数となる傾向もわかった。

次に、図??に調査期間中のコンタクト回数をペア毎にまとめたものを示す。図から、ペアのうちおよそ12%は30日間の調査期間に一度もコンタクトがなかったことがわかる。全体の1%以下のペアが1000回を超えるコンタクトを記録した他は、コンタクト回数800~0の間で一様にコンタクト回数が分布する傾向にあり、ペア間で頻繁にコンタクトのあるペアとないペアという関係があることが伺える。

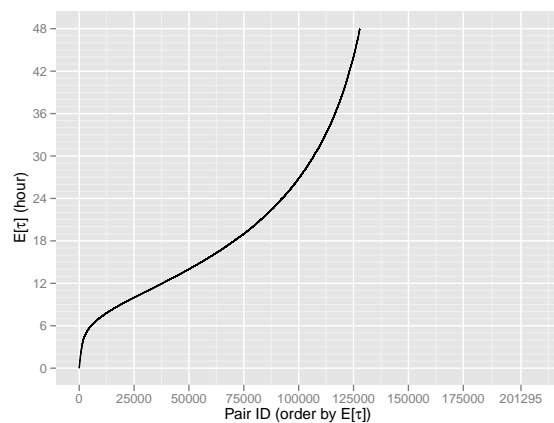
図??にペア毎の平均コンタクト間隔を示す。 $E[\tau]$ はペアのコンタクト間隔の平均値である。ペアの75%は平均コンタクト間隔が12時間未満であることがわかる。



(a) 時間あたりの総コンタクト回数

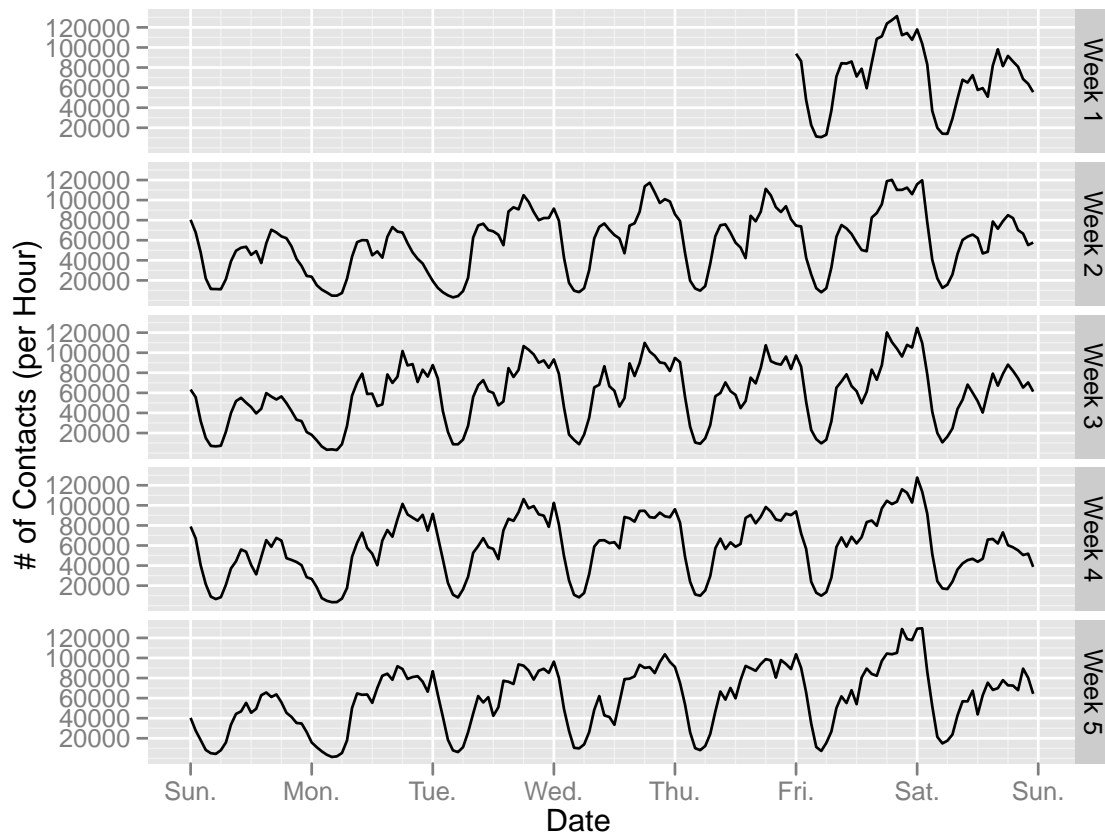


(b) ペア毎のコンタクト回数

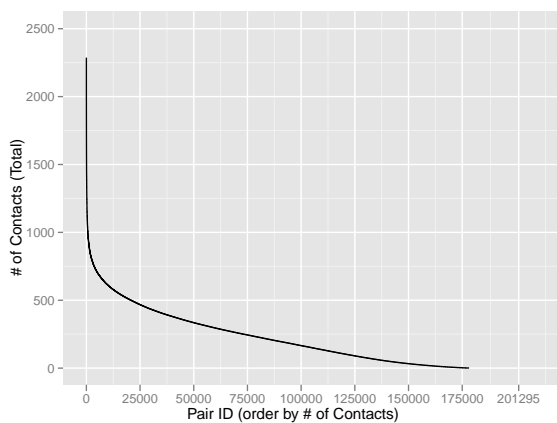


(c) ペア毎の平均コンタクト間隔

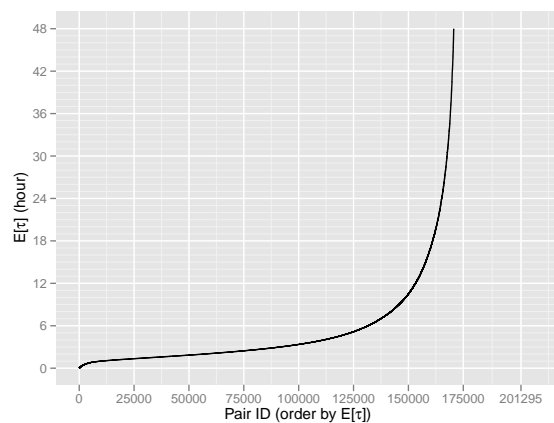
図 4.1: 名古屋データセットの解析結果 ($k=10m$)



(a) 時間あたりの総コンタクト回数

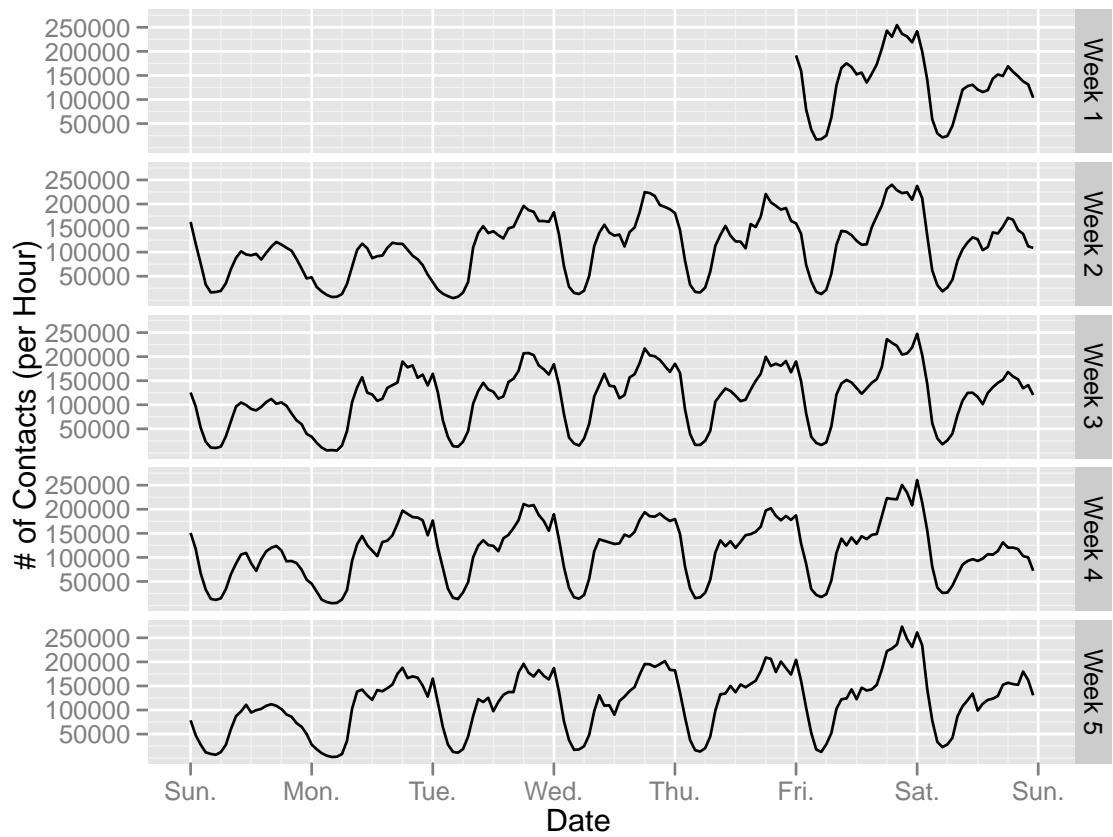


(b) ペア毎のコンタクト回数

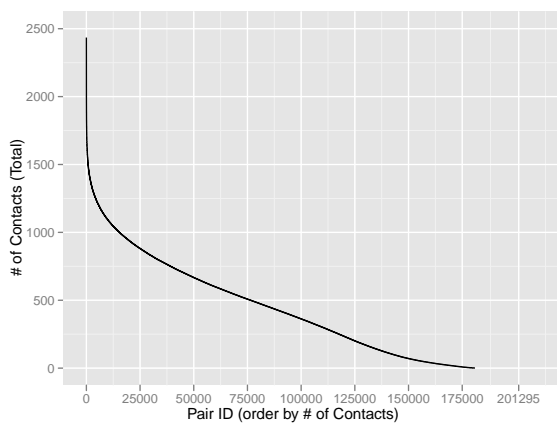


(c) ペア毎の平均コンタクト間隔

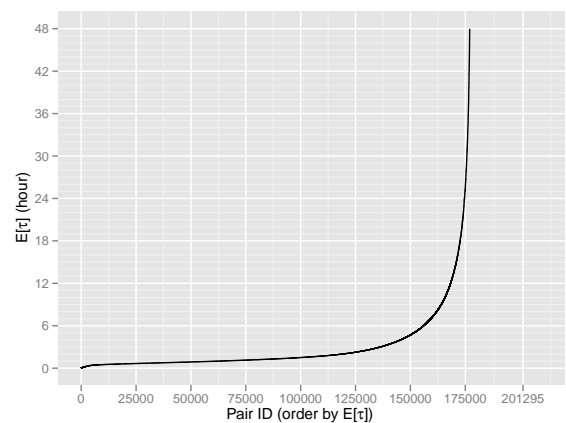
図 4.2: 名古屋データセットの解析結果 ($k=100m$)



(a) 時間あたりの総コンタクト回数



(b) ペア毎のコンタクト回数



(c) ペア毎の平均コンタクト間隔

図 4.3: 名古屋データセットの解析結果 ($k=1000m$)

第 5 章

車車間通信環境上での DTN ルーティング手法の評価

5.1 評価手法の概要

車車間通信により、交通情報を集約し、センターに集めるアプリケーションを想定して評価を行う。評価には DTN シミュレーターの TheONE[?] を用いる。

5.1.1 評価対象

Epidemic と PRoPHET と SprayAndWait を評価対象のルーティング手法とする。

5.1.2 評価軸

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 アプリケーションの想定

本研究では車車間通信環境での DTN の評価のために、フォローティングカーシステムを模したアプリケーションによりトラフィックを発生させる、模擬アプリケーションのモデルを図 5.1 に示す。

模擬アプリケーションはセンタと車両からなり、車両が生成した走行情報をセンタが集約して、交通情報を生成するアプリケーションを模している。車両はセンサ車両とコレクタ車両からなり、センサ車両は一定の間隔で自車の生成し走行通情報を模したトラフィックをセンタ宛てに発生させる。センサ車両はセンタへの通信手段を持たないが、コレクタ車両がセンタとの通信手段を持っており、センサ車両からセンタへの通信はコレクタ車両を経由することで届けられる。車両と車両の間には無線の通信チャンネルがあり、車両間が一定距離より近い場合に通信が可能である。また、各車両は一定量のストレージを備えており、このストレージと無線通信機能を利用して DTN ルータとして通信の中継機能を持つものとする。

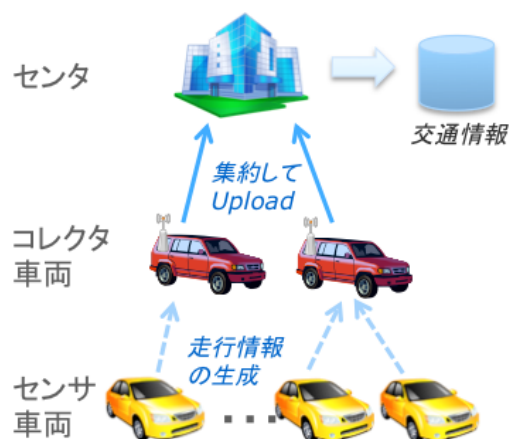


図 5.1: アプリケーションのモデル

5.3 シミュレーションパラメータ

シミュレーションを行うにあたり、設定したパラメータを表??、表??に示す。シミュレーションはこのパラメータ範囲内での検証を行った。

表 5.1: ネットワークのパラメータ

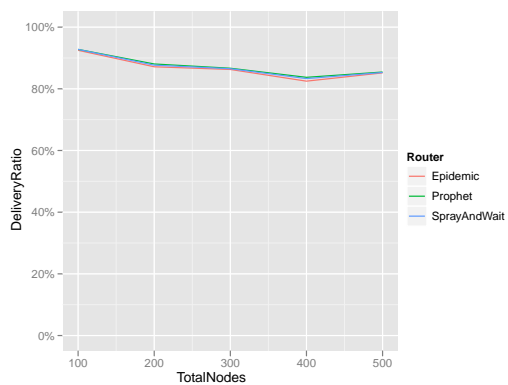
項目	値	初期値
ノード総数	100-500	300
コレクタ割合	1-10%	5%
ストレージ容量	1-5Mbyte	1Mbyte
通信帯域	1-8Mbps	1Mbps
通信範囲	10-1000m	100m

表 5.2: アプリケーションのパラメータ

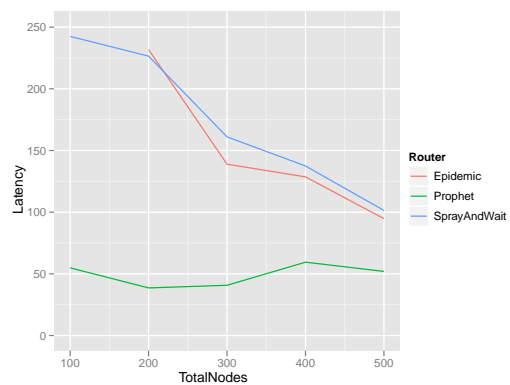
項目	値
メッセージサイズ	10 kByte
メッセージ生成間隔	600sec

5.4 シミュレーション結果

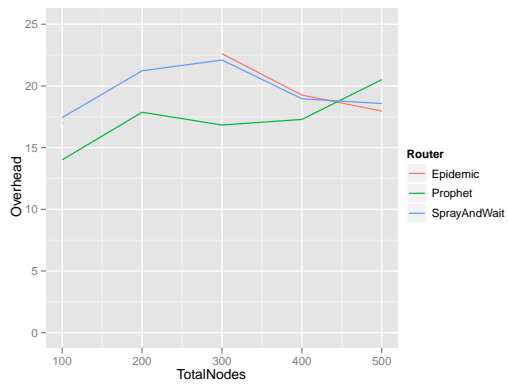
シミュレーションの結果を以下に示す。図??はノードの総数に対してのパフォーマンス変化を比較した図である。



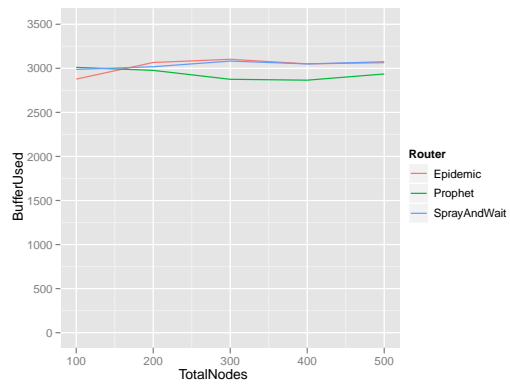
(a) メッセージ到達率



(b) メッセージ到達所要時間

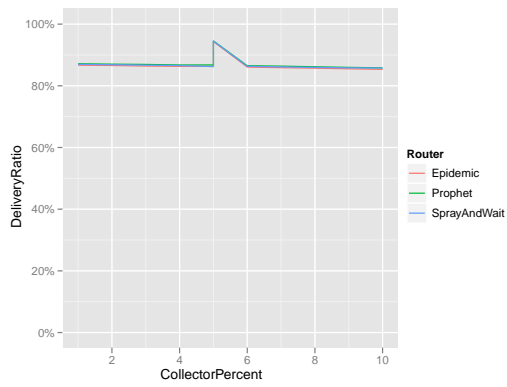


(c) メッセージ転送回数 (メッセージあたり平均)

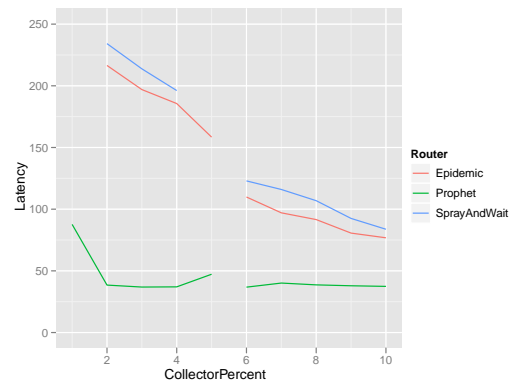


(d) ストレージ使用量 (メッセージあたり平均)

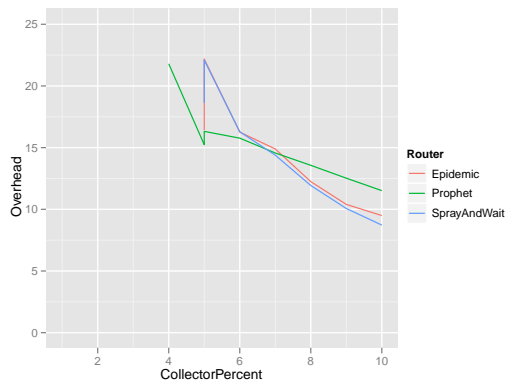
図 5.2: ノードの総数がパフォーマンスへ与える影響の評価



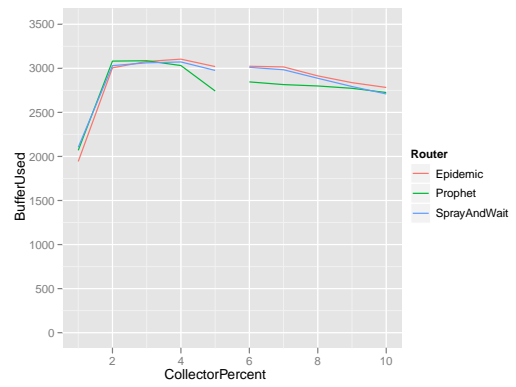
(a) メッセージ到達率



(b) メッセージ到達所要時間

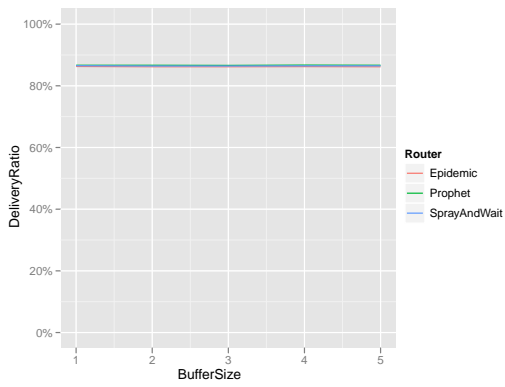


(c) メッセージ転送回数 (メッセージあたり平均)

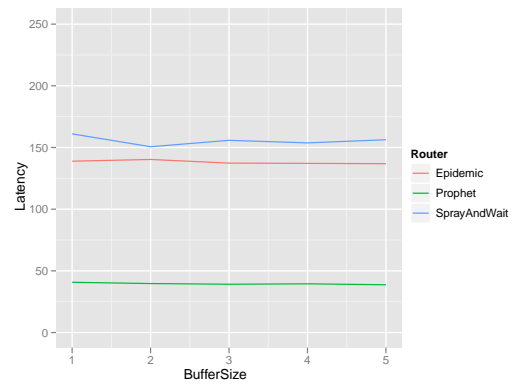


(d) ストレージ使用量 (メッセージあたり平均)

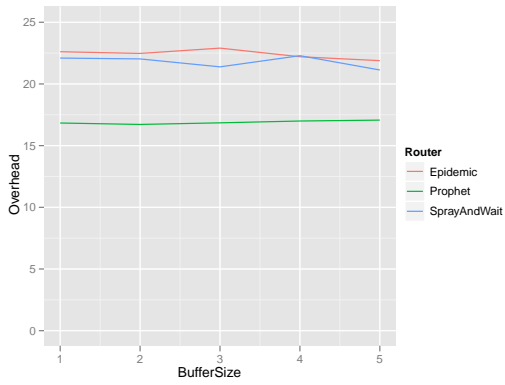
図 5.3: コレクタノードの割合がパフォーマンスに与える影響



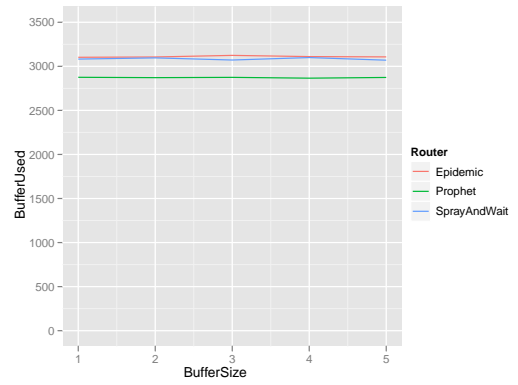
(a) メッセージ到達率



(b) メッセージ到達所要時間

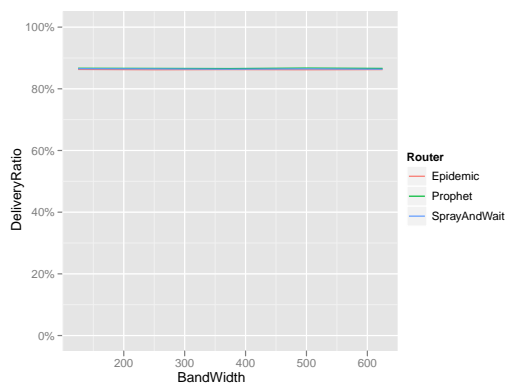


(c) メッセージ転送回数 (メッセージあたり平均)

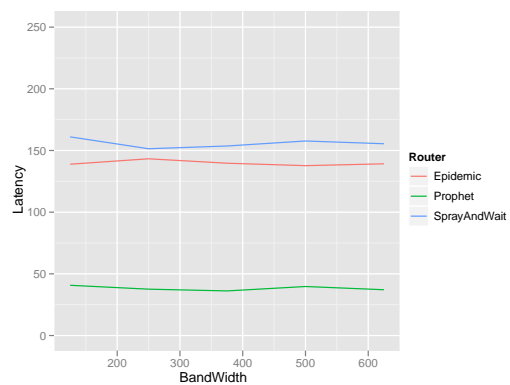


(d) ストレージ使用量 (メッセージあたり平均)

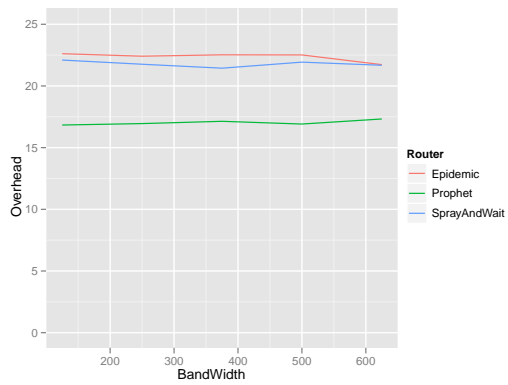
図 5.4: ノードの持つストレージ容量がパフォーマンスへ与える影響の評価



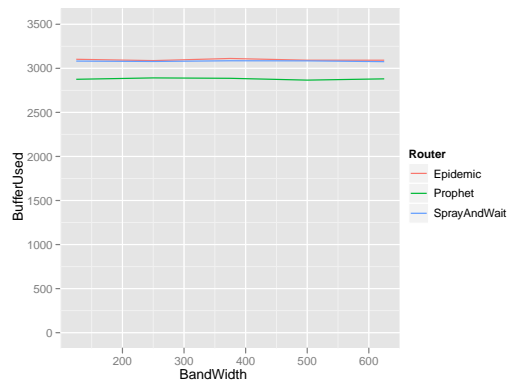
(a) メッセージ到達率



(b) メッセージ到達所要時間

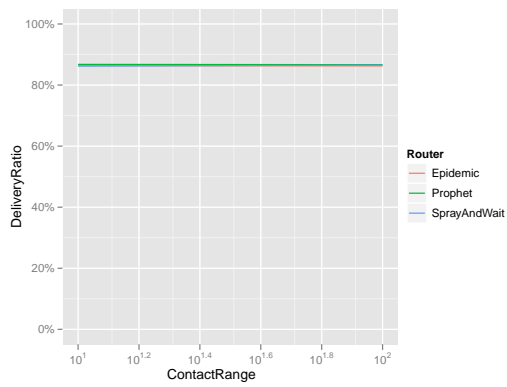


(c) メッセージ転送回数 (メッセージあたり平均)

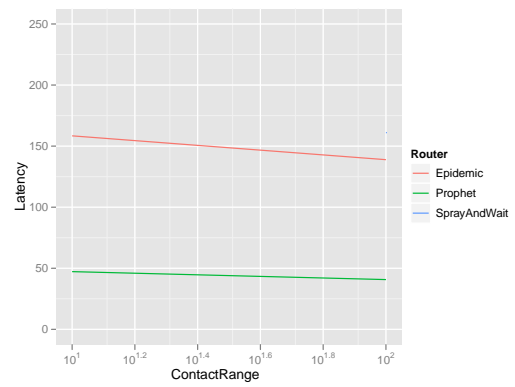


(d) ストレージ使用量 (メッセージあたり平均)

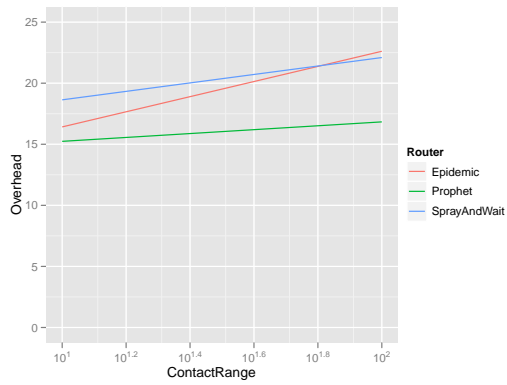
図 5.5: ノード間の通信帯がパフォーマンスに与える影響の評価



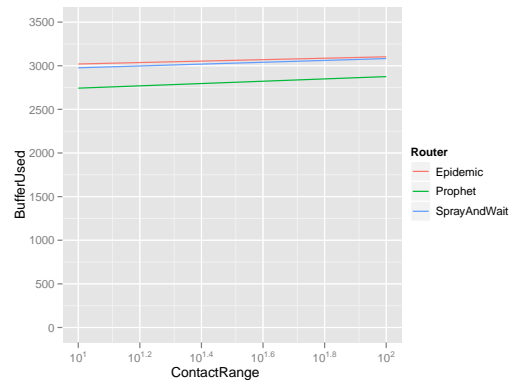
(a) メッセージ到達率



(b) メッセージ到達所要時間



(c) メッセージ転送回数 (メッセージあたり平均)



(d) ストレージ使用量 (メッセージあたり平均)

図 5.6: ノード間の通信可能距離がパフォーマンスに与える影響の評価

第 6 章

おわりに

本研究では平成 14 年度 ITS 名古屋実証実験より得られた実環境での車両運行データを元に、車車間通信環境をシミュレートし、DTN ルーティングの性能評価を行った。

評価の結果、PRoPHET ルーティングがメッセージの到達所要時間やネットワークリソース消費の観点から優れ、車車間通信を想定した DTN のルーティング手法として適していることが明らかになった。

謝辞

本論文の作成にあたり、主査である慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士、副査である東京大学大学院情報理工学研究科江崎浩博士、環境情報学部准教授植原啓介博士のご指導・ご助言によるところが大でありました。この場を借りて御礼申し上げます。

また、常々ご指導いただいています、慶應義塾大学環境情報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 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、政策・メディア研究科特別研究講師佐藤雅明博士、同研究科特任講師吉藤英明博士にもこの場をお借りして感謝いたします。

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松谷健史氏、岡田耕司氏、堀場勝広氏、空閑洋平氏に感謝します。

修士論文執筆で苦楽を共にし、励まし支え合った上原雄貴氏、永山翔太氏、重松邦彦氏に感謝します。また、iCAR 研究グループの中で澤田暖氏、村上滋希氏、倉田彩子氏、木本瑞希氏に感謝します。

そして、徳田・村井・楠本・中村・高汐・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。