

## データサイズと送信期限を考慮した DTN 経路制御手法

孫 為 華<sup>†1</sup> 石 丸 泰 大<sup>†1</sup>  
安 本 慶 一<sup>†1</sup> 伊 藤 実<sup>†1</sup>

本論文では、通信インフラが使用できない2地点間で、送信期限及び重要度により差別化したデータを効率よく搬送するために、Carry and Forward に基づいたデータの経路制御手法を提案する。提案手法では、対象エリアに InfoBox と呼ぶ無線通信可能なバッテリー駆動の小型サーバを複数設置し、各 InfoBox には、訪問ユーザが、隣接する他の InfoBox を次に訪れる確率と移動時間を保持させる。ユーザはデータを送信する際、送信データに重要度と送信期限を付加し、宛先を指定して付近の InfoBox へデータを投函する。InfoBox はデータを指定された送信期限に間に合うよう、付近のユーザにデータを運搬させ宛先 InfoBox に配送する。多数のユーザがデータを複数送信した際、ネットワークが輻輳し到達率が低下するおそれがある。提案手法は、送信期限までに宛先 InfoBox への配送が完了するデータの重要度の総和を最大化することを目的とする。これを実現するため、InfoBox において、通りがけのユーザに運搬させるデータのスケジューリング手法を提案する。具体的には(1)一定のデータ到達率を保证するデータ複製数の見積もり(2)データサイズを考慮したコストパフォーマンス順のデータ送信(3)配信予定時刻の推定によるデータの早期破棄、などの方法を用いて、消費通信帯域を軽減し、重要度の高いデータの期限内の配送率を高める。計算機シミュレーションにより、提案手法が他のスケジューリング手法と比較して20~50%程度重要度の総和が大きいデータ配送を実現することを確認した。

### Data Routing for DTN Environments According to Data Size and Deadline

WEIHUA SUN,<sup>†1</sup> YASUHIRO ISHIMARU,<sup>†1</sup>  
KEIICHI YASUMOTO<sup>†1</sup> and MINORU ITO<sup>†1</sup>

In this paper, in order to allow mobile users to efficiently send data with relative importance and deadline in an area where communication infrastructure is not available, we propose a data routing method utilizing the carry-and-forward technique. We suppose that multiple battery-driven portable servers called "InfoBoxes" are deployed in the target area and the user's moving probability and time between any two locations with InfoBoxes is given to each InfoBox. A user can send data with importance degree to a neighboring InfoBox, asking the InfoBox to deliver the data to another InfoBox which is specified as the data destination within a certain deadline. In the situation that many users

issue such data transmission requests, our objective is to maximize the sum of importance degrees of data that are delivered within their deadline. To do so, we propose a data scheduling method for InfoBoxes. Our scheduling algorithm (1) decides the appropriate number of data replicas copied to user terminals to keep a good delivery ratio, (2) copies data to user terminals in the order of their cost performance considering their data size, and (3) quickly discards data that are unlikely to be delivered within deadline. These techniques reduce the resource consumption and increase the number of on-time deliveries. Through simulations, we confirmed that the proposed method achieves 20 to 50 % better performance in terms of the total sum of importance degrees of delivered data than conventional scheduling methods.

### 1. ま え が き

本論文では、重要度と送信期限により差別化したデータを Carry and Forward という DTN (Delay/Disruption Tolerant Network) で用いられるデータ交換方式を利用して、対象エリア内を移動する複数ユーザに運搬させることで、通信インフラが使用できない2地点間での非同期通信を実現する手法を提案する。DTN は中断や切断が多発する劣悪な通信環境において、ある程度の信頼度でデータ転送を実現する通信方式であり(1)広域無線網(WWAN, Wireless Wide Area Network)に流れるデータのバイパスや(2)災害時における通信手段の一つとしての利用が想定される。それぞれの背景について以下で述べる。

#### 1.1 DTN 通信法の用途

近年、携帯電話網をはじめとする WWAN に対する通信の需要が急速に増えており、キャリアの提供できる通信容量を圧迫している。iPhone などのスマートフォンの普及により、携帯電話網を介して送受信されるデータ量が急増している。このうちデータ通信が90%以上を占めており、今後2~3年で現在の50倍にも達すると携帯電話業界が予測している。データ量増加のペースが無線通信容量の増加よりも遥かに早い現状のままでは、近い将来、WWAN では深刻な輻輳が発生し、スループット低下だけでなく、サービスの維持も困難となりかねない。そこで、有線ネットワークインフラの普及している地域で、有線ネットワークに一部のデータをバイパスし、新興国などインフラの普及が遅れている地域では、DTN にデータをバイパスする方法が考えられる。

また、地震、洪水、ハリケーンなど自然災害が世界各地で頻発している。そのような災害の被災地では、人的な被害に加え、生活基盤である各種インフラ施設に対する破壊も深刻である。とりわけ通信インフラが被害を受けた場合、救援活動やその後の復旧活動に支障をきたす。そこで、DTN を用いれば、被災地において簡単に即席の民間用通信ネットワークを構築できる。配送の確実性と配送時間に対する保証を与えることができれば、被災地における救援活動用通信インフラの帯域や利便性の問題をある程度解決できると思われる。

<sup>†1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology

以上で述べたように、DTN 通信方式を用いることで、既存の狭域無線網を介してデータの収集と散布を行い、その際、広帯域を利用できるため、短時間に大容量のデータ交換が可能である。また、往來するユーザがデータを運ぶメディアとなるため、全ユーザの移動範囲が DTN のカバー範囲となり、敷設コストなしで広大なエリアをカバーすることが可能である。

### 1.2 提案手法の概要

本論文では、DTN 環境において離れた地点間でデータを搬送するルーティング手法を提案する。その際、個々のデータの重要度、データサイズ、及び送信期限を考慮する。これらの属性に基づき送信期限内に重要度の高いデータを送信先にできるだけ多く搬送することが提案手法の目的である。

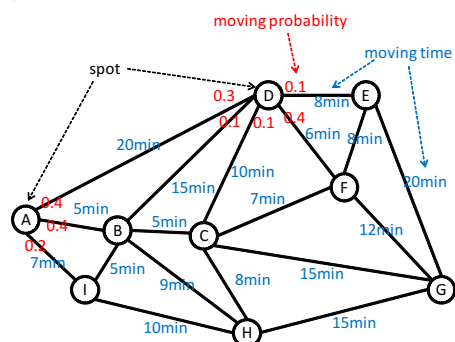


図1 対象エリア

提案手法を適用するアプリケーション例を図1に示す。広大な対象エリアの中に、複数のスポット (A - I) とそれらを接続する道 (リンク) があり、携帯情報端末を携えるユーザは、ある確率に従い道を辿ってスポット間を移動する。道に付いている時間はその道を通るのに必要な移動時間である。各スポットには InfoBox と呼ばれる小型サーバが置かれており、InfoBox がその付近の通信を取り仕切る。ユーザはスポットに滞在中、狭域無線 (WiFi, Bluetooth など) で InfoBox と交信できる。

提案手法では 2 地点間のデータ配送経路を決定するため、以下の機能を InfoBox に実装する。これらの機能を実現するための諸仮定は 3 章で詳述する。

- 時間制約を満たす経路の選択：あらかじめ設定された送信期限内に、送信が完了できる経路を選択する。例えば、図1のAからDまで22分以内にデータを送りたい場合、AD (20分)、ABD (20分)、ABCD (20分) は制約を満たす経路で、ABCFD (23分) は制約を満たさない経路となる。
- 必要最低限のデータ複製数の見積もり：ユーザが確率的にスポット間を移動するため、上記(1)で決定した経路を辿るユーザにデータを運搬させる確率を高めるために、送信したいデータを複製し、複数のユーザに渡す必要がある。しかし、むやみに複製を増やせばネットワークの負荷が大きくなり性能が悪くなるため、必要最低限の複製数を見

積もる。

- 送信コストパフォーマンスの見積もり：データの種類、重要度やサイズによる価値の違いがある。また、これらのデータを送信する際、必要となる複製数が異なるため、一様に送信すると、価値の高いデータが埋もれてシステムの性能が低下する恐れがある。提案手法では、重要度対必要送信データ量のコストパフォーマンスを見積もり、この値が高いデータから送信する。
- 輻輳時送受信データ量の調整：輻輳環境では、あらかじめ作成した送信スケジュールがうまく機能せず、遅延が生じた結果データの送信期限に間に合わず、性能が劇的に悪化する場合がある。輻輳時にボトルネックとなる部分を特定し、そこで交換されるデータ量を削減することで、輻輳による影響を軽減する。

以上の機能により、提案手法は離れた地点間の重要度と送信期限を考慮した非同期データ配送を実現する。

提案手法の有効性を確かめるため、マンハッタンエリアを対象としたシミュレーション実験を行った。複数の他手法と比較した結果、提案手法による送信データの到達率は10~25%高く、データの種類に基づき価値を差別化した場合、到達したデータの価値が20~50%も高い結果を示した。

## 2. 関連研究

DTN は中断や切断が多発したり、大きな伝送遅延が生じたりする劣悪な通信環境でも、信頼性のあるデータ転送を実現する通信方式である。TCP/IP の開発者として知られる V.Cerf と DTN の標準化団体である DTNRG (Delay Tolerant Networking Research Group)<sup>1)</sup> のメンバーが共同で執筆した RFC4838 には、DTN のアーキテクチャがまとめられている。DTN は 2008 年 11 月に NASA (米航空宇宙局) が彗星探査機「EPOXI」による通信実験に成功したことで注目を集めた。

よく知られた DTN ルーティング手法は Epidemic ルーティング<sup>2)</sup> である。Epidemic ルーティングを実装したノードは一定の確率 (パラメータ) でメッセージの再配布を行うことで、メッセージの氾濫を回避しつつ、高い送信到達率を達成することができる。一方、帯域とノードバッファの使用量について、スケーラビリティの問題が残っている。

Zhao ら<sup>3)</sup> はノード同士の低い遭遇率が DTN における低いデータ到達率の原因と指摘し、ThrowBox と呼ばれるストレージとフォワード機能を備えるゲートウェイを対象エリアに設置することで、ノード同士が直接遭遇しなくてもデータ交換ができるようにした。また、シミュレーション実験でデータ到達率と配送遅延の改善を確認した。

Wizzy<sup>4)</sup> は通信インフラのない過疎地に対し DTN を利用したインターネットアクセスサービスを提供する実験プロジェクトである。類似のプロジェクトとして、TIER<sup>5)</sup>、KioskNet<sup>6)</sup> が知られている。

上述した研究はデータ伝送の際の遅延短縮や到達率向上を目的としている。しかし、実環境で DTN によるデータ伝送サービスを提供する際、伝送するデータの種類、サイズと送信期限を考えなければならない。それは、ノード同士の遭遇時間は限られており、時間内にすべてのデータを交換できないためである。その時、これらの属性に基づき、データの価値

を差別化することで、より価値の高いデータを送受信し、より高いパフォーマンスを得ることが出来る。しかし、著者らの知る限りにおいて、これらを考慮に入れた研究はまだ存在しない。

我々は文献 7) で観光地と観光客を対象に、データの重要度と送信期限を考慮した DTN 配送手法を提案した。この研究の中で、我々は ThrowBox に似たデバイス InfoBox を導入した。InfoBox は ThrowBox より高度な機能を持ち、データの重要度と送信期限を考慮したデータ送受信スケジューリングを行う。

本論文では、文献 7) で提案した観光地に特化した DTN 送信手法を改良し、WWAN におけるデータ送信のバイパスや、被災地での情報流通基盤にも適用できるよう問題を一般化した。また、輻輳時パフォーマンスを保証するためのメカニズムを導入し、新メカニズムの有効性を確かめるために新たな実験を行う。

### 3. 提案手法に関する諸仮定

#### 3.1 対象エリアに関する仮定

対象エリアとして複数のスポットとそれらを接続する道路からなる地理領域を想定する。図 1 はその一例である。対象エリアの各スポットに InfoBox と呼ばれる小型サーバが置かれており、その付近の通信は InfoBox を介して行うとする。

本手法では、スポット間のユーザの移動確率や所要時間を統計的に把握していると仮定しており、各 InfoBox がその情報を管理する。また、エリアのスポットや道路の構成は静的で変化せず、すべての InfoBox が対象エリア全体のネットワーク構造とユーザの移動確率と所要時間を知っている。ユーザの移動モデルに関しては後述する。

#### 3.2 想定アプリケーションと扱うデータ

提案手法の適用例として、データ検索のアプリケーションを想定する。ユーザはあるスポットの InfoBox において(図 1 の A)、離れたスポットにある InfoBox (図 1 の D)に向けて、クエリを含めたデータを送信する。スポット D の InfoBox がこのクエリを受信すると、クエリに指定された返信先の InfoBox に対し返信データを送信する。たとえば、ユーザが指定した返信先は A の InfoBox であれば、A と D 間の双方向通信、D の InfoBox であれば単方向の送信、他の InfoBox であれば、第三の InfoBox への送信となる。

このアプリケーションで扱うデータは、送信先、データサイズといった一般的な属性のほか、以下の属性も持つと仮定する。

**送信期限:** データがこの時間までに宛先 InfoBox まで届けられなければ失効する期限である。送信期限の決め方の例として、送信期限は (a) データ受信者が宛先 InfoBox からデータをダウンロードする予定時刻 (b) Bit Tolerant 方式で複数データ断片を集めてデータを解凍する期限、などが考えられる。本手法では、送信期限はユーザがデータを送信する際に指定するものとする。

**重要度:** データの価値を表す指標であり、提案手法はデータの重要度とサイズ等に基づき、送信コストパフォーマンスを見積もる。重要度はユーザが与えるものとする。重要度の決め方の例として、データの種類(テキスト、マルチメディア)、アプリケーションの種類やユーザの支払う対価によって決めるなどが考えられる。

#### 3.3 InfoBox に関する仮定

InfoBox はスポットの通信ゲートウェイサーバの役割を果たす。バッテリー駆動のノート PC などを InfoBox として使用できる。InfoBox は周辺の通信をコントロールし、ユーザと InfoBox 間の通信順序やデータの転送を一元的に管理する。InfoBox は下記のような機能を持っているとする。

- 狭域無線通信機能 (IEEE802.11, Bluetooth など) を利用可能である。
- スポット付近の通信を中継するための十分なストレージ容量を持つ。
- 提案プロトコルを実行するための演算能力と記憶容量を持つ。

InfoBox はユーザから送信データを受け取れば、それを送信期限内に宛先 InfoBox に届けるよう、提案手法を適用して、複製数や通りかかったユーザへ渡す順序などを決める。

#### 3.4 ユーザ端末に関する仮定

ユーザ端末は対象エリアを移動する人が所持する携帯通信デバイスを意味する。以降、ユーザと呼ぶ。ユーザと InfoBox 間の通信は InfoBox にコントロールされる。具体的には、以下を仮定する。

- 狭域無線通信機能 (IEEE802.11, Bluetooth など) を利用可能である。
- InfoBox から送信されるデータを保持するための十分なストレージ容量を持つ。
- 提案プロトコルを実行するための演算能力と記憶容量を持つ。

ユーザは送りたいデータを持っている場合、通りかかった InfoBox に対しそれを送る。また、InfoBox からデータの搬送を託される場合もあり、その場合、次に通りかかったスポットにある InfoBox に到着するまでデータを保持する。

ユーザ端末は InfoBox とのみ通信を行い、ユーザ端末間の通信、すなわち「すれ違い通信」を行わないとする。すれ違い通信を行う場合、無線通信デバイスを常にアクティブ状態にしなければならないほか、データを渡す相手がどこに行くかもわからない状況にあるため、通信効率が低く、バッテリーの消耗が大きいためである。

#### 3.5 ユーザの振る舞いに関する仮定

対象エリアにいる各ユーザは独自に決めた移動経路を所持しており、その経路に従って移動する。提案手法では、各 InfoBox はユーザがどのような経路を持つかは知らずに、移動する際の大きな確率を統計情報として知っているとする。都市の交通管理部門は道路や交差点の各方面に向かう車両数と歩行者数を定期的に調査し、この統計データに基づいて道路設計を行うことが多い。本手法はこのような統計データを取得できると仮定している。被災地など統計情報がない地域では、往来するユーザ数が増えるにつれ、時間とともにより正確な統計データが形成されると思われる。ユーザは対象エリアを移動する際、リンクを辿ってスポット間を移動する。リンクの移動時間は統計情報と一致するものとする。

提案手法は、重要度と送信期限を重視した DTN 送信手法である。前述したように、各データへの重要度、送信期限の設定は、ユーザが独自に行うこととし、その方法は本論文では議論しない。今回の想定アプリケーションでは、ユーザが自身の送りたいデータを InfoBox に送信する際、送信期限と重要度をランダムに設定するとし、合計 100 ポイントの重要度をデータに割り当てることができるとしている。ユーザが宛先 InfoBox である *DEST* ヘー

タを送る際、重要度を  $X$  ポイントと設定し、送信期限を設定した場合、このデータが期限までに宛先 InfoBox である  $DEST$  に送信できれば、ユーザが  $X$  ポイントの重要度と引き換えに  $X$  ポイントの満足度を得る。一方、期限までに  $DEST$  に送信できなければ、ユーザが  $X$  ポイントの重要度を失うが、満足度が得られない。

### 3.6 InfoBox とユーザ間の通信

本論文で用いる無線通信はすべてディスクモデルと想定している。InfoBox もユーザも半径  $r$  のディスク範囲を通信可能範囲とする。対象エリアの各スポット間の距離は  $r$  以上で、互いに有線や無線による直接通信ができないとする。また、3.4 節で説明したように、ユーザ同士はすれ違い通信を行わないため、提案手法での通信はすべて InfoBox 対ユーザとなる。

ユーザと InfoBox が交信できるデータ量はコンタクト時間に比例する。 $BW$  を InfoBox とユーザの使用する狭域無線通信帯域とし、 $T_{contact}$  をユーザと InfoBox がお互いに通信範囲にいる時間とすれば、一回のコンタクトで送受信できるデータ量の理論上限は  $BW \times T_{contact}$  である。InfoBox 付近に複数のユーザがいる場合、InfoBox はそれぞれと通信する時間と順番を決め、順番に通信を行う。

## 4. スケジューリングアルゴリズム

提案手法は、限られた情報を用いて、3.7 節の問題の解となるヒューリスティックな送信スケジュールを出力する。ユーザの動きを完全に把握できれば、InfoBox で最適な送信スケジュールを策定できるが、そのような仮定は非現実的である。本手法の場合、InfoBox はユーザの動きを確率的に把握しているため、グリーディに送信スケジュールの生成と更新を行う。

### 4.1 基本アイデア

提案手法では、大きく次の 3 つのアイデアを応用する。

- (1) 帯域を節約しながら、データを宛先に届けるために、InfoBox 間のユーザ移動確率に基づいて必要数のデータの複製を異なるユーザに渡し運搬させることで、高い到達率を実現する。
- (2) 送信データの重要度とサイズ、複製数(上記(1)より算出)に基づき、送信データのコストパフォーマンス期待値(ECP, 単位データあたりの重要度)を算出し、ECP の高いデータを優先的に配送する。
- (3) 送信期限までに送信されないデータは送信されても帯域の浪費になるため、このようなデータを廃棄する。提案手法では、データが InfoBox にアップロードされる前に、まずそのデータが期限内に送信できるかどうか InfoBox で見積もられ、送信できると見積もられたデータだけがアップロードを許可される。

### 4.2 提案手法の詳細

本節では、提案手法における(1)適切なデータ複製数の見積もり(2)データ送信のコストパフォーマンスの計算について説明する。

#### 4.2.1 データ複製数の見積もり

3章の仮定より、InfoBox は各ユーザの移動先を確率的にしか把握していない。そのため、

本手法は複数のユーザにデータを複製し、数を増やすことにより確率的にデータの到達率を増加させる。しかし、むやみに複製を増やせば、ネットワークの負荷を増加させ、全体として送信できるデータ量が減少してしまう。そこで、以下の方法で必要最小限のデータ複製数を求める。

データを運搬するユーザ確率的に決められた経路に沿って移動するため、100% の到達率は保証できない。そこで、データ到達率の指標として、以下の項目を定義する。

- 要求到達率 システム側で保証するデータ到達率。送信期限内に送信データが宛先 InfoBox に到達する確率で、 $\delta$  で表す。
- 期待到達率 InfoBox がユーザの移動確率に基づき、要求到達率を満たすために算出したデータ複製数により達成される予測到達率で、 $\delta'$  で表す。

InfoBox はユーザが隣接スポットへ移動する確率  $pMove(Box_i, Box_j)$  を統計的に知っているとして仮定している。これに基づいてデータ複製数  $n$  を以下の式(1)により算出できる。

$$1 - (1 - pmove(Box_i, Box_j))^{n(m)} \geq \delta \quad (1)$$

例えば、図1におけるスポット  $A$  から  $B$  へ移動する確率が  $pMove(A, B)$  が 0.4 である。要求到達率  $\delta = 0.9$  の場合、必要とされる複製数  $n$  は式(2)より容易に求めることができる。

$$1 - (1 - 0.4)^{n(m)} \geq 0.9 \quad (2)$$

この式を満たす最小の整数  $n$  は 5 であり、5 個の複製データによる期待到達率  $\delta'$  は 0.92224 となる。

#### 4.2.2 データ送信コストパフォーマンスの計算

データ ( $m$ ) を 1 ホップ送信する場合のコストパフォーマンス期待値  $ECP(m)$  (単位データあたりの重要度, Expected Cost Performance) は、重要度 ( $Imp(m)$ )、期待到達率  $\delta'$ 、データサイズ ( $Size(m)$ )、データ複製数  $n(m)$  から式(3)により求まる。

$$ECP(m) = (Imp(m) \times \delta') / (Size(m) \times n(m)) \quad (3)$$

期待到達率  $\delta'$  が高いほど、複製数  $n(m)$  を大きくする必要があり、それによる  $ECP(m)$  の低下が起こる。このため、 $ECP(m)$  を最大にする  $\delta$  と  $n(m)$  の組が存在し、それを求めることで最大のコストパフォーマンス期待値が得られる。

複数ホップを経由するデータを送信する際、経由したホップ数が増加するにつれ、指数的に到達率が低下してしまう。このため、複数ホップで到達する宛先に対しデータ配送を行う時には、1 ホップで到達可能な宛先に送る場合に比べ、複製数を増やす必要がある。

しかし、経由ホップ数の大きいデータは複製数が増大するため、ネットワークの負荷を増やし、システム全体のパフォーマンスを低下させる原因になる。このため、輻輳している時は、ホップ数の大きいデータを配信するよりも、ホップ数の小さいデータを優先して配信したほうが、システムのパフォーマンスが高くなると考えられる。この問題を解決するために、ホップ数の大きいデータにペナルティを課す仕組みを導入した。

$$penalty = -0.2 \times (h - 1)^2 + 1 \quad (4)$$

予備実験により、ホップ数の大きいデータに式 (4) で定義されたペナルティを負わせる時、最大のパフォーマンスが得られることがわかった。ただし、式 (4) のペナルティは 3 ホップ以内の送信のみを対象としている。

これにより、マルチホップの場合も含む最終的な  $ECP(m)$  の値は式 (5) によって計算される。

$$ECP(m) = (Imp(m) \times \delta') / (Size(m) \times n(m)) \times penalty \quad (5)$$

#### 4.3 輻輳対処措置

最大パフォーマンスを達成するための複製数の理論値を見積もったが、輻輳環境を想定した予備実験では、予想以上にパフォーマンスの低下が見られた。様々な実験の結果、原因として以下の 2 点を特定し、それぞれの解決案を導入した。

- **アップロード・ダウンロード量の不均衡:** InfoBox は複数ユーザが無線範囲に存在した時それらとの交信順序を制御していなかったため、輻輳時にはユーザから InfoBox へのデータアップロード、InfoBox からユーザへのデータダウンロードのデータ量の比率が適正でなくなり、期待到達率を達成できなくなった。  
これを解決するために、データ送信調整カウンター機能を導入した。InfoBox とユーザ間に交信されるデータ量に制限を設け、アップロードデータ量とダウンロードデータ量を 1 :  $n$  の比率に従わせる。 $n$  はアップロードされたデータを中継するために必要な複製数である。この機能により、アップロードされたデータに対し、複製し配送するための帯域を確保することとなる。
- **送信データの遅延増大:** InfoBox は送信期限に間に合わないデータも受信してしまうため、帯域の浪費が生じ、送信待ちデータの待ち時間が見積もりよりも長くなる。そのため、送信期限に間に合わなくなるデータが増えてしまい、到達率を低下させてしまう。これを解決するために、選択的アップロード機能を導入した。InfoBox はユーザから uploadRequest を受信すると、そのデータが送信期限に間に合うかどうかを見積もり、送信期限に間に合わないと判断した場合、データの受信を拒否する。送信期限に間に合う場合、このデータを送信キューに仮挿入し、送信キューに影響を受けて送信期限を過ぎるデータが発生するかをチェックする。そのようなデータがあれば、両方の重要度を比較し、重要度が高いほうを選択する。以上により、輻輳時には、ユーザが運搬してきたデータは、既に InfoBox に蓄積されている送信待ちデータより重要度が高い時のみ、アップロードが許可される。

### 5. 性能評価

提案手法により、システム全体で達成される重要度の総和を評価するために、マンハッタンモデルをフィールドとして想定したシミュレーション実験を行った。シミュレータには、Java により実装した独自のシミュレータを用いた。

#### 5.1 シミュレーション設定

送信されるデータの総量が DTN での輸送可能容量を超える輻輳状態を実現するために、

表 1 Simulation Configuration

通信プロトコル	Bluetooth
無線距離	10m
有効帯域	1Mbps
各 InfoBox とのコンタクト時間	20 sec × 2
スポット間距離	300m
データサイズ	100KB (50%) 200KB-1000KB (50%)
初期ユーザ所持重要度ポイント	100
データに対する重要度の与え方	10 ... 100 (10 段階)
シミュレーション時間	18 時間
InfoBox 数	9
平均ユーザ数	約 3,000
ユーザ歩く速度	1m/s
ユーザ経路	既定経路からランダムに選択

個々のデータサイズを変動させ、異なるネットワーク負荷におけるシミュレーション実験を行った。具体的な実験設定を表 1 に示す。実験用アプリケーションは、2 ホップ先の InfoBox へデータを送信するものである。用いたエリアシナリオは 4 種類である。

ユーザの移動モデルや、InfoBox に関する設定は 3 章で述べた通りである。各ユーザは、平均到着間隔 60 秒のポアソン到着に従って、各々のスタート地点から、自身の設定したスポットの巡回を開始する。さらに、各スポットに到着する度に、60 分滞し、次のスポットに出発する。ユーザと InfoBox のコンタクトタイム、すなわち交信可能時間は、人間の歩行速度を考慮し、ユーザがスポットに到着および出発する際、20 秒ずつとしている。そこで、今回の実験ではノードがスポットに到着する際、InfoBox に対してデータをアップロードし、スポットから離れる際、InfoBox からデータを受け取るとしている。InfoBox で実行するスケジューリング方式として、提案手法と以下の 3 つのスケジューリング方式を比較した。

- **FIFO:** データの到着順で配送する方式
  - **deadline:** 送信期限の短い順に配送する方式
  - **satisfaction:** 重要度が高い順に配送する方式
- 比較指標は下記の二つである。
- **平均データ到達率:** 宛先 InfoBox へ送信期限内に送り届けたデータ数が全データ数に対する比率。
  - **平均ユーザ満足度:** 宛先 InfoBox へ送信期限内に送り届けたデータに付与された重要度の総和のユーザ数平均。

#### 5.2 他手法との比較結果

混在するデータのサイズを 2 種類にし、100KB:200KB から 100KB:1000KB まで、100KB ずつ変化させながら実験を行った。また、データサイズの組毎に 10 回シミュレーションを行う実験を 1 セットとして、4 つの異なるユーザ移動経路の組み合わせについてそれぞれの実験を行った。4 セットの実験の平均データ送信到達率および平均ユーザあたりの満足度を実験した。結果を図 2 に示す。

ここで、データ到達率とは、送信期限までに指定されたひとつの InfoBox を経由し、宛先 InfoBox に送られたデータ数対最初に投函された全データ数の比率である。ユーザあたりの満足とは、ユーザが期限内に送信し期限までに宛先に到達したデータに付与していた重要度の総和をユーザ数でとった平均である。全環境での平均データ到達率を図 2 (a)、平均



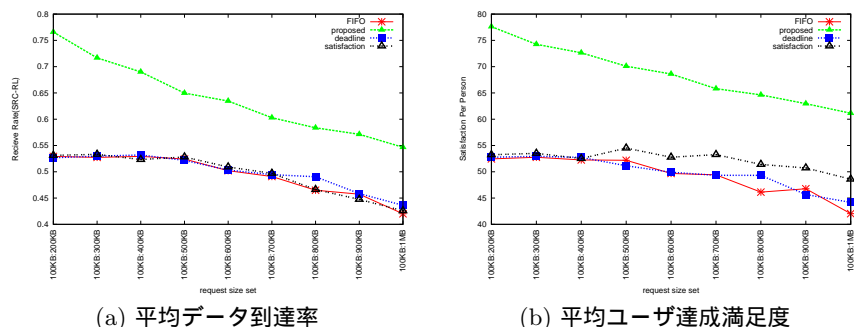


図2 提案手法と比較対象手法の結果

ユーザ満足度を図2(b)に示す。図2(a)より、データサイズが増加し、ネットワークに与える負荷が大きくなり輻輳状況が悪化するほど、どの手法も到達率が下がっている。しかし提案手法 (proposed) は、100KB:200KB の時は 25%、100KB:1MB のときは 10%程度、他の手法よりも優れていることが確認できる。また、図2(b)より、輻輳状況が悪化するほど、どの手法も得られる満足度が下がっていく様子が確認できる。しかし提案手法は、100KB:200KB の時は 50%、100KB:1MB のときは 20%程度、他の手法よりも優れていることが確認できる。

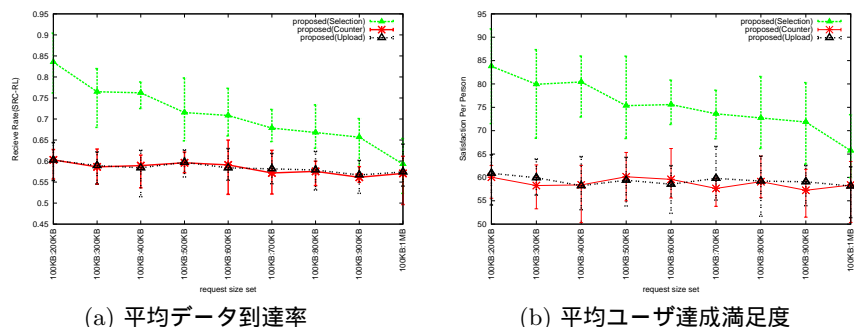


図3 輻輳対処措置による影響

### 5.3 輻輳対処措置の性能

提案手法に加えた選択的アップロード機能がどの程度効果があったかを確認する。以下の3つの方式の比較を行った。

- Selection: 選択的アップロード方式
- Upload: ノードから情報BOXへのアップロードを優先する方式

- Counter: アップロードとダウンロードを  $1:n$  (複製数) に保つ方式

なお、上述の方式のキュー管理はすべてECPの値順とする。データ送信成功率の結果を図3(a)に示す。各手法の関係は、同様の傾向があることが確認できる。もっとも輻輳が軽い(100KB:200KB)のとき、Selectionは他の手法よりも20%程度優れている。この結果は、アップロードされるデータ候補のなかから送信期限に間に合うものを選択し、帯域を有効に使用する効果だと考えられる。

また、輻輳の状況が悪化するほど、Selectionの送信成功率も下がっていき(100KB:1MB)では、他の手法と拮抗する。これは、Selectionも他の手法も、100KBのデータは宛先InfoBoxに送ることができているが、サイズの大きい(200KB~1000KB)データが、徐々に届けられなくなったせいだと考えられる。さらに、今回CounterとUploadの差がほとんどなかったが、これはアップロードの過負荷の程度が比較的小さかったためだと考えられる。

## 6. あとがき

本論文では、通信インフラを利用できない環境を想定し、データの重要度と送信期限を考慮したDTN送信手法を提案した。提案手法は、(1)一定のデータ到達率を保証するデータ複製数の見積もり、(2)コストパフォーマンスの良い順にデータを送信、(3)配送予定時刻の推定によるデータの早期破棄、といった方法を用いて、ネットワークの負荷を軽減する工夫を行った。これにより、従来の研究では実現されていなかった、DTNでの重要度と配送期限を考慮したデータ転送が実現できた。

シミュレーション実験により、提案手法はデータ到達率に関して、他の手法より10%から25%程度優れていることを確認した。また、平均ユーザ満足度に関して、他の手法より20%から50%程度優れていることを確認した。現在、我々は提案手法をiPhoneへの実装を行っている。iPhoneのBluetooth通信機能を利用して実機テストベッドの構築とそれを用いた実験を計画している。

## 参考文献

- 1) DTNResearch Group. <http://www.dtnrg.org/>.
- 2) A. Vahdat and D. Becker. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical report cs-2000-06, duke university, 2000.
- 3) W. Zhao, Y. Chen, M. Ammar, M. Corner, B. Levine, and E. Zegura. Capacity enhancement using throwboxes in dtns. In *Proc. IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '06)*, pages 31–40, 2006.
- 4) TheWizzy project. <http://www.wizzy.org.za/>.
- 5) TheTIER project. <http://tier.cs.berkeley.edu/>.
- 6) KioskNet. <http://blizzard.cs.uwaterloo.ca/tetherless/index.php/KioskNet/>.
- 7) Y. Yishimaru, W. Sun, K. Yasumoto, and M. Ito. DTN-based Delivery of Word-of-Mouth Information with Priority and Deadline. In *Proc. the 5th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010)*, 2010.