

メッセージの重要度と配送期限を考慮した DTN 経路制御手法の提案と評価

孫 為 華^{†1,†2} 石 丸 泰 大^{†1}
安 本 慶 一^{†1,†2} 伊 藤 実^{†1}

本稿では、通信インフラの無いエリアにおいて、モバイルユーザが重要度や有効期限などの属性を持ったデータを効率よく取得できるようにするため、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、対象エリアに情報 BOX 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、各情報 BOX には、訪問ユーザが、隣接する他の情報 BOX を次に訪れる確率と移動時間を保持させる。ユーザは、ある情報 BOX に存在するデータを、自身が将来訪れる別の情報 BOX (宛先情報 BOX) に指定時刻までに配送してほしいというリクエストを通りがけの情報 BOX に重要度をつけて投函する。多数のユーザが同様のリクエストを複数発行した際に、指定期限までに宛先情報 BOX に配送されるデータの重要度の総和を最大化することが目的である。これを実現するため、情報 BOX 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順のデータ送信 (3) 配送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 Delivery Method Taking into Account Data Importance and Deadline in DTN Environment

WEIHUA SUN,^{†1,†2} YASUHIRO ISHIMARU,^{†1}
KEIICHI YASUMOTO^{†1,†2} and MINORU ITO^{†1}

In this paper, in order to allow mobile users to efficiently acquire data with relative importance and acquisition deadline in an area where communication infrastructure is not available, we propose a data delivery 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 mov-

ing probability and time between any two locations with InfoBoxes is given to each InfoBox. A user can send a request with importance to the neighboring InfoBox, asking that some data stored in an InfoBox are delivered to another InfoBox to which the user will visit in the future, by the specified time. In the situation that many users issue such 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 so that the specified delivery ratio is guaranteed, (2) copies data to user terminals in the order of their cost performance, 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 than conventional scheduling methods.

1. ま え が き

近年、携帯電話や WiMAX など広域無線網が発達し、将来的にそれを介した大容量コンテンツの取得がより活発になると予想される。しかし、広域無線網の通信帯域は限られているため、多数のユーザが同時に大容量のコンテンツを送受信すれば、送受信速度の低下や他のサービスの品質低下を招く。広域無線網の帯域使用量を節約するための補助的通信手段として、WiFi などのアドホックネットワークが考えられる。しかし、アドホックネットワークで広いエリアを完全にカバーすることは困難なため、アドホックネットワークをエリア内の複数のスポットに散発的に構築し、スポット間は人間や車両の移動によりデータの受け渡しを行う遅延耐性ネットワーク (DTN, delay/Disruption Tolerant Network²⁾) が近年注目されている。即時性が要求されるコンテンツを広域無線網から、即時性が要求されないコンテンツを DTN で取得することによって、広域無線網の帯域圧迫を軽減できる。

近年、携帯電話には Bluetooth や WiFi が標準装備され、携帯電話同士のみならず、パソコンとの連携なども行うことができるようになった。DTN 技術を用いることによって、固定ネットワークを使用しない情報検索と流通のプラットフォームを構築することが可能と考えられる。DTN 技術の標準化を研究する専門グループである IRTF DTNRG³⁾ の活動とその関連研究により、これまでにいくつかキャリアアンドフォワード (通信可能な端末

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

†2 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
JST, CREST

が現れるまで、情報を保持し続けたまま移動することにより情報転送を可能とする技術)を用いた経路制御手法が提案されてきた。Epidemic routing¹¹⁾は、移動中に会ったノードに、確率的に複製を配信する、もっとも基本的な DTN ルーティング手法である。他にも、コンタクトオラクル(いつどのノードとコンタクトするかという情報)が利用できるという仮定のもと、コンタクト待ち時間が最小になる通信パスの選択を行う MED⁵⁾や、過去のコンタクト履歴情報を収集してコンタクト待ち時間を予測する MEED⁶⁾という手法が提案されている。しかし、これらの既存手法は、いずれもデータ配送における遅延時間を小さくしデータ到達率を均一に高めることを目標としており、データ間の重要度が考慮されていない。そのため、輻輳が発生する際、すべてのデータにおいて一様に到達率が低下し、システム全体の性能が著しく低下してしまう問題がある。

本稿では配送データの重要度や配送期限を考慮し、重要かつ緊急性のあるデータを優先して処理することによって、輻輳が発生する場合でも、重要度の高いデータの配送成功率をできるだけ高くすることを目的とする DTN 環境でのデータ配送手法を提案する。下記の課題を解決することによって、輻輳環境下でシステムパフォーマンスの最大化を目指す。

- (1) データの要求到達率を保つための適切なデータ複製数
- (2) データの有効期限と重要度に基づいた最適なデータ配送スケジューリング
- (3) 輻輳が発生する際にパフォーマンス損失を最小限にとどめるためのデータ廃棄

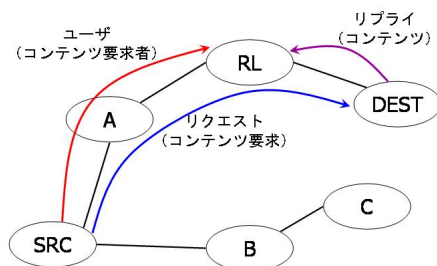


図 1 対象アプリケーションのイメージ

図 1 は本稿で想定するアプリケーションの一例である。対象エリア内の複数スポット(図では、SRC, RL, DEST, A, B, C)に、情報 BOX と呼ぶ近距離無線通信可能な PC が設置されていると想定する。さらに、ユーザは近距離無線通信機能を備えた携帯端末(携帯電話、ノート PC など)を所持しており、情報 BOX とデータの送受信を行えるとする。ただし、広域無線帯域の節約とユーザ端末のバッテリー消費を考慮し、情報 BOX 間や、ユーザ間

の通信は行わないものと想定する。

図 1 を用いて本稿で提唱する DTN 通信の仕組みについて説明する。例えば、スポット SRC に滞在中のユーザは、一定の対価(重要度)を支払ってスポット DEST に保存されているコンテンツを将来訪れる予定のスポット RL にて受け取りたいと考えている。この場合、SRC から DEST までユーザのコンテンツ要求を含めたリクエストを転送し、それを受信した DEST から RL までリプライとなるコンテンツを送信する必要がある。その際、リプライはユーザが RL を出発する時刻(配送期限)までに到着しなければならない。全てのコンテンツの配送要求が、DTN での輸送可能容量以内で処理できる時には、配送要求を順番に処理しても問題は生じないが、サイズの大きいデータが多数送受信され、DTN の輸送容量を超えた場合、全てのデータをそれぞれ配送期限まで配送することは不可能である。そのような場合、個々のデータを配送する際の予想コストパフォーマンス(ECP, 配送する単位データ量に対する重要度)を計算し、ECP の大きいデータほど優先的に配送を行うことで、システムのパフォーマンスを最大化することが望ましい。以上より、本稿では、配信するデータに重要度と配送期限の属性を持たせ、配送期限までに配信されるコンテンツの重要度の総和をできるだけ大きくする経路制御手法を提案する。

本稿では、各情報 BOX は、

- (1) リクエストの重要度、及びそれを達成するために必要なデータ複製量(リクエストとリプライ)の見積り、
- (2) データ複製量に基づき、各データの ECP を計算し、ECP の高いデータを優先的に配信するようスケジュール管理、
- (3) 輻輳発生時、重要度の高いデータを優先的に配送し、重要度の低いデータを遅らせ、配送期限に間に合わないデータの破棄により、帯域負担を軽減させ、送信スケジュールを最適化

という 3 つのアイデアを用いてデータ配送要求が DTN での輸送可能容量を超えた場合には、システム全体で得られる重要度の総和を最大化するデータ配送を行う。

提案手法の有効性を確かめるために、マンハッタンモデルを想定したシミュレーション実験を行った。その際、比較対象として、(1) データの先着順(FIFO 式)キュー、(2) 重要度順キュー、(3) 配送期限順キューを用いた。さまざまなユーザの移動パターンで、コンテンツのデータサイズを変化させ実験を行った結果、提案手法のデータ配送成功率は他の手法よりも 10% から 25% 程度優れていることを確認した。また、重要度の総和においては、提案手法が 20% から 50% 程度優れていることを確認した。

2. 関連研究

近年、DTN に関する研究が盛んに行われている。DTN 技術の標準化を研究する専門グループである IRTF DTNRG³⁾ の活動により、これまでにいくつかの経路制御手法が提案されてきた。通信可能な全ノードにデータを配信するフラッディングと異なり、移動中に会ったノードに確率的にデータを複製する Epidemic routing¹¹⁾ は DTN における基本的な手法であり、複製する確率に応じて高い到達率を得られるが、バッファ容量や通信帯域を無駄に消費し、スケラビリティの点で問題があると考えられている⁵⁾。そのため帯域やバッファを節約し、人や車のモビリティを効果的に利用して情報を配信する様々な研究が行われている。

Jain ら⁵⁾ の研究では、通信の断絶のパターンが既知のものとし、遅延を最小にする経路制御問題の定式化を行っており、幾つかの基本的なルーティングアルゴリズムの提案が行われている。Yong ら¹³⁾ は、符号化したメッセージを $k \times r$ 個のブロックに分割し（このブロックの合計サイズは、元のメッセージの r 倍になる）、 k 個のブロックが宛先に到達すれば、元のメッセージが復元されるような符号化を既存のルーティング手法に導入することを提案している（ k は定数、 r は複製因子:replication factor）。この研究により、一定のオーバーヘッドを保ちつつ、遅延時間を抑えることができることを明らかにしている。

Zhao ら¹⁶⁾ は送信の機会（コンタクト）が多ければ DTN の性能が改善されると考え、ThrowBox という情報を蓄積する固定ノードを配置して DTN をネットワーク容量の面で強化することを提案した。情報を蓄積する固定ノードをシステム内に複数配置し、各ユーザの通信の機会を増やす。Throwbox の最適な配置場所を決定するアルゴリズムと、マルチパスルーティングでデータ配送を行うアルゴリズムを提案し、シミュレーションによってその効果を確認している。Banerjee ら¹⁾ は Zhao らの研究¹⁶⁾ をさらに発展させ、実際に Throwbox の試作品を作成したうえで、電力消費量を改善する方法を提案し、UMassDieselNet¹⁰⁾ と呼ばれるバスを利用したテストベッドを用いて実機による実験を行い、Throwbox によって遅延時間が改善することと、データ配送率と Throwbox の電力消費量がトレードオフとなることを明らかにしている。

DTN での輻輳制御研究として、文献 9), 15) では、バッファ残量が足りない場合は近隣のノードにメッセージを移動させることで、輻輳を回避している。また、DTN に関するいくつかの研究開発プロジェクトも活発に行われている。Wizzy⁸⁾ は、敷設コストの問題でインターネットの使用できないエリアに、人のモビリティを利用してデータを運ぶことで、インターネットサービスを提供するプロジェクトである。Haggle⁷⁾ は、PSN(Pocket Switched Network) と呼ばれる、携帯端末を所持したユーザのモビリティを利用してデータを運ぶこ

とで形成されるネットワークに関する研究を行っているプロジェクトである。Haggle プロジェクトでは、ノード間のコンタクト時間をログデータとして記録し、そのログデータを元に DTN におけるルーティングの研究などを行っている。文献 4) では、Infocom 2005 の会場で端末同士のコンタクト時間を記録し、人や時間によってコンタクト時間に特徴があることを明らかにしている。

上で述べたように、DTN において到達率を高めるためにさまざまな工夫や実験が行われている。しかし、現実に利用可能な通信帯域を考えれば、要求されたデータを一度のコンタクト時間に送信しきれない場合も存在する。重要なデータを優先的に受信するために、データの重みに応じた優先制御が必要であるが、既存研究はデータの緊急性や重要度などは考慮されていない。

本研究グループは文献 14) にて観光地を対象エリアとし、観光スポットに対する口コミ情報を DTN で取得するアプリケーションを想定し、データの重要度と配送期限を考慮した経路制御法を提案した。Throwbox モデル¹⁶⁾ に近い情報 BOX を利用し、データ配送する際、データの重要度と配送期限に基づいて見積もった配送コストパフォーマンスを重視し、システム全体で達成される重要度を最大化するスケジューリング法を採用した。

本稿では、対象エリアを一般性のあるマンハッタンモデルと想定し、輻輳時に配送キューイング遅延によるパフォーマンス低下のボトルネックの解消を目標とし、配送期限に間に合わないデータの破棄により、帯域負担を軽減させ、送信スケジュールの最適化を行う拡張を行った。これにより、データ取得率の上昇やユーザ毎に達成される重要度の増加を実現する。

3. DTN を利用したデータ配送問題に関する諸仮定

本章では、提案手法を実現するための前提条件となる諸仮定について述べ、対象とする DTN を用いたデータ配送問題を定義する。本章および以降の章で用いる用語の定義を表 1 にまとめる。

表 1 用語の定義

用語	記号	意味
配送期限	Deadline	コンテンツを受け取るまでの配送期限。
重要度	Importance	ユーザがコンテンツ要求（リクエスト+リプライ）に対して付与する対価点数。要求したコンテンツを配送期限までに受け取れば、その対価を支払う。
移動確率	pMove(x, y)	スポット x に滞在している人が次のスポット y に移動する確率
コストパフォーマンス期待値	ECP	コンテンツ要求のコストパフォーマンスの期待値（重要度/データ量）。

提案手法では、ユーザは携帯端末を持ち、図 1 のような対象エリアにおける各スポットの情報 BOX とデータ交換を行うものとする。以下で携帯通信端末および情報 BOX に関する仮定を述べる。

3.1 ユーザ携帯端末に対する仮定

提案手法におけるノードとは、携帯電話、PDAのような携帯通信端末を所持するユーザである。携帯通信端末は、下記の機能を持っている。

- プログラム処理能力: 提案手法を実装したプログラムを処理する能力。
- デバイス ID: 各端末はユニークな ID を持つ。この ID だけで端末を特定できる。
- 電子地図: 指定した 2 点間の歩行経路およびその距離を計算できる。
- バッファ: データ送受信メモリバッファ。移動中に情報 BOX から送信されるデータを全て保存できる程度に大きい。
- 通信機能: Bluetooth などによる近距離の無線通信ができる。

ただし、ノード間の直接通信(すれ違い通信)は行わないものとする。それは、ノード間の通信を行う場合、ノードが常にプローブを行う必要がありバッテリーを多く消耗するためである。提案手法では、ノードの移動速度とスポット間距離から、ノードと情報 BOX とのコンタクト時間を見積もることができるため、コンタクトする時だけ、ピンポイント的にノードの無線通信デバイスをオンにすることで、電力消費を最小限に抑える。

3.2 情報 BOX に対する仮定

対象エリアの各スポットにデータの蓄積と送受信機能を有するバッテリー駆動の小型サーバ(ラップトップ PC など)が一台ずつ設置されており、これを情報 BOX と呼ぶ。情報 BOX はその付近を往来するノードと無線通信ができ、リクエストやリプライ(コンテンツ)をデータとした双方向通信が行える。情報 BOX からノードに対するリクエストとリプライの送信順序は、その情報 BOX がスケジューリングを行う。

また、情報 BOX は統計データに基づき、その情報 BOX にコンタクトしたノードが隣接スポットに移動する確率と移動にかかる時間を把握しているとする。スポット間は距離が長く、広域無線通信が使えないと想定しているため、情報 BOX 間の通信はできないものとする。

3.3 ノードの移動モデル

本節では、実際の歩行者の移動特徴を模倣したノードの移動モデルを用いる。各ノードは独自に決めた経路に沿って移動し、経路情報を他のノードや情報 BOX と共有しない。隣接スポット間の移動所要時間は一定であり、それぞれのスポットでの滞在時間も一定であるとする。これらの情報を統計データとして情報 BOX は把握しているとする。

3.4 DTN における重要度と配信期限を考慮したデータ配信問題

提案手法では図 1 に示すような環境で、リクエスト投函地点(例えば SRC)から、コンテンツ所在地(例えば DEST)に向けてコンテンツ要求のリクエストを転送し、リクエストの送信ノードがデータ受け取り地点(例えば RL)を離れるまでに、DEST のコンテンツ

を RL の情報 BOX に送り届けるシステムを実現する。

ノードがデータ受け取り地点を離れる時刻は、コンテンツの配信期限となり、この期限までにコンテンツを受信できなければ、リクエストは時間切れとなり、無効となる。

また、ノード間のデータ取得の公平性を実現するため、各ノードに、コンテンツ取得対価として一定のポイントを配布する。ノードはリクエストを出す際、そのリクエストに対しいくらかのポイント(そのリクエストの重要度となる)を付与し、データ受け取り地点にて要求コンテンツが得られた場合、そのポイントをシステムに支払うものとする。提案手法の目標は、システム全体で得られるポイント(達成された重要度)の総和を最大化することである。

4. 提案手法

本章では、提案手法のアルゴリズムについて説明する。提案手法は、大きく次の 3 つのアイデアからなっている。

(1) 帯域を節約しながら、データを宛先に届けるために、情報 BOX 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、高い配信率を実現する。

(2) 配送データの重要度とデータ量(上記(1)より算出)に基づき、配送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) 配信期限までに配信されないデータは価値を失い、配信されても通信帯域の浪費になるため、このようなデータを廃棄する。

4.1 ノードと情報 BOX の動作

提案手法の機能は情報 BOX に実装され、各ノードと情報 BOX とのデータのやり取りは情報 BOX より制御される。

ノードの動作

ノードは無線通信範囲に情報 BOX があれば、自動的に情報 BOX と接続する。ノードは情報 BOX に対してデータ(リクエスト、または中継するデータ)を送信したい場合、まず、データの種類、コンテンツサイズ、配信期限、重要度などを含むメタ情報を情報 BOX に送信する。その後、情報 BOX の指示に従い、データを情報 BOX に送信(アップロードと呼ぶ)または破棄する。情報 BOX からデータを取得(ダウンロードと呼ぶ)する場合、それがリクエストしたコンテンツならユーザに提示し、そうでなければバッファに格納し次に訪れるスポットの情報 BOX までデータを保持・運搬する。

各ノードは次のスポットに移動する際、そこへの搬送の到着時間がわかっているため^{*1}、それまでの間無線通信のプロープを行わず、デバイスをオフにすることで、電力消費を節約する。

情報 BOX の動作

情報 BOX はノードから送信したいデータのメタ情報を受信した後、データのサイズに応じてノードとの交信時間を決め、ノードからデータを受け取る。情報 BOX は受信したデータの重要度とコンテンツサイズに基づき、次ホップに到達させるために必要な複製数 n を計算し、コストパフォーマンスとして、データパケットあたりの重要度を求め、コストパフォーマンス上位のデータを優先的に配送するスケジュールを決定する。スケジュール上位のデータは、そのスポットから出発する n 個のノードにコピーされる。

また、情報 BOX はバッファ内に保存されているデータの配送予定時刻を定期的に再計算し、配送期限に間に合わないデータを破棄する。

4.2 経路制御および送信スケジュール管理

情報 BOX は経路の制御や送信スケジュールの管理を行う。各情報 BOX 間で制御メッセージを交換することなく、各々独立に管理を行う。

複製数の見積もり

3章の仮定より、情報 BOX は各ノードの移動先を確率的にしか把握していない。そのため、本手法は複数のノードにデータを複製し、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リクエストやコンテンツ数が減少してしまう。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。

データを運搬するノードは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 リクエストを出す際、指定コンテンツを受け取る確率である。システム管理者により設定され、 δ で表す。
- 期待到達率 情報 BOX がノードの移動確率に基づいて算出した要求到達率を満たすための複製データ数により達成される予測到達率であり、 δ' で表す。

3章の仮定により、情報 BOX はノードが隣接スポットへ移動する確率 $pMove(Box_i, Box_j)$ を統計的に知っており、これに基づいてデータ複製数 n を以下の式 (1) により算出する。

$$1 - (1 - pMove(Box_i, Box_j))^n \geq \delta \quad (1)$$

例えば、図 1 における情報 BOX SRC から隣接スポットの情報 BOX A へのノード移

*1 ノードは隣接スポットの集合とそこへの到達時間を情報 BOX とのコンタクト時に取得し、それぞれの時間にプロープを行う。

動確率 $pMove(SRC, A)$ が 0.4 とする。要求到達率 $\delta = 0.9$ の場合、必要とされる複製数 n は次式 (2) より容易に求めることができる。

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

また、この場合、 n 個の複製データによる期待到達率 δ' は 0.92224 となる。

配送期限の見積もり

各リクエストの配送期限は、ノードがそのリクエストを生成した時点から、受信地点 RL までの移動時間および RL を含む途中で立ち寄るスポットでの滞在時間の合計となる。各情報 BOX 間の移動時間やスポットでの平均滞在時間は仮定より予め与えられているため、配送期限は容易に計算できる。ノードがリクエストを出す際、受信地点 RL を指定すれば、携帯通信端末は現在地点 SRC と受信地点 RL 間の最短経路の通過時間および途中で立ち寄るスポットでの平均滞在時間から自動的に計算し、これを配送期限としてリクエストに含める。

図 2 はデータ運搬の経路で、表 2 は各種時間の内訳である。この場合、式 (3) が満たされなければ、データ配送が間に合わないことになり、データは破棄される。

表 2 時間の種類

時間の種類	値
SRC から DEST へデータ運搬必要時間	α
DEST から RL へ運搬必要時間	β
各情報 BOX におけるキューイング時間	ϕ
リクエストしたノードが RL に行くまでの時間	γ
RL での滞在時間	θ
メッセージの配送期限	deadline

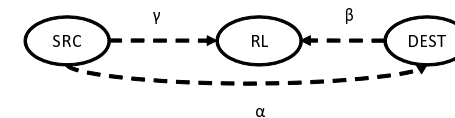


図 2 メッセージ配送時間の見積もり

$$deadline = \gamma + \theta \geq \alpha + \beta + \phi \quad (3)$$

コストパフォーマンス期待値の見積もり

データを 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(単位データあたりの重要度, Expected Cost Performance) は、重要度 (Importance), 期待到達率 δ' , デー

サイズ (*DataSize*), データ複製数 n から式 (4) により求める.

$$ECP = (Importance \times \delta') / (DataSize \times n) \quad (4)$$

期待到達確率 δ' が高いほど, 複製数 n を大きくする必要があり, それによる ECP の低下が起こる. このため, ECP を最大にする δ と n の値の組が存在し, 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.

さらに, 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. h ホップを経由すれば, 以下の式 (5) のように, 指数的に ECP 値が低下する.

$$ECP = (Importance \times \delta^h) / (DataSize \times n) \quad (5)$$

そのため, 提案手法で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.

ペナルティの計算

経由ホップ数の大きいデータは複製数が増大するため, 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. そのため, 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する. ただし, ペナルティが大きすぎると, ホップ数の大きいデータがまったく送信されなくなってしまう, 公平性が失われてしまう.

予備実験により, ホップ数の大きいデータに式 (7) で定義される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, この式は 3 ホップ以内の送信のみを対象とした.

これにより, マルチホップの場合も含む最終的な ECP の値は式 (7) によって計算される.

$$penalty = -0.2 \times (h - 1)^2 + 1 \quad (6)$$

$$ECP = (Importance \times \delta') / (DataSize \times n) \times penalty \quad (7)$$

アップロード量とダウンロード量の調整

本研究は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 点を特定した.

(1) データのアップロード量とダウンロード量の比率: 情報 BOX は複数ノードが無線範囲に存在する時それらとの通信順序を制御していないため, 輻輳時にはノードから情報 BOX へのデータアップロード, 情報 BOX からノードへのデータ複製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る.

(2) 配送データの遅延増大: 情報 BOX は配送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, 配送待ちデータの待ち時間が見積もりより長くなる. そのため, 配送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.

上記の問題を解決するために, 以下の手法を採用する.

- (1) データ配送調整カウンター機能 情報 BOX とノード間に通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と 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.
- (2) 選択的アップロード機能 情報 BOX はノードからメタ情報を受信すると, そのデータが配送期限に間に合うかどうかを見積もり, 配送期限に間に合わない判断した場合, データの受信を拒否し, ノードに対して廃棄するよう指示する. 配送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配送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, ノードが運搬してきたデータは, 既に情報 BOX に蓄積されている配送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 実験設定

配送要求されたデータの総量が DTN での輸送可能容量を超えた輻輳状態を再現するために, 個々のコンテンツ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 3 に示す.

ノードの移動モデルや, 情報 BOX に関する設定は 3 章で述べたものである. 各ノードは, 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 分滞在し, 次のスポットに出発する. ノードと情報 BOX のコンタクトタイム, すなわち通信可能時間は, 人間の歩行速度を考慮し, ノード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, 情報 BOX 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, 情報 BOX からデータを受け取るとしている.

情報 BOX 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

表 3 シミュレーション設定

通信方式	Bluetooth
通信半径	10m
伝送容量	1Mbps
ノードと情報 BOX のコンタクトタイム	合計 40 秒
隣接スポット間の距離	300m
リクエストメッセージのサイズ	1KB
コンテンツサイズ (2 種類)	100KB (50%) 200KB ~ 1000KB(50%)
各ノードの初期ポイント	100
リクエストに付与されるポイント	10 ... 100(10の倍数)
シミュレーション時間	約 18 時間
フィールド上に存在する情報 BOX 数	9 (配置: 3 × 3)
フィールド上に存在するノード数の平均	約 3000
ノードの移動速度	1m/s
ノードの移動方法	各ノードが独立に決めた経路

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 配送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

5.2 評価結果

コンテンツのデータサイズ 2 種類を 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 つの異なるノード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コンテンツ取得成功率およびノードあたりの達成重要度を取得した。結果を図 3 に示す。

ここで、コンテンツ取得成功率は、SRC で投函された全リクエスト数に対する RL で受信されたリプライの数の割合であり、ノードあたりの達成重要度は、各ノードが期限内に取得したコンテンツに付与していた重要度の和である。全環境での平均メッセージ取得成功率を図 3(a)、平均ノード達成重要度を図 3(b) に示す。

図 3(a) より、コンテンツサイズが増加し、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、どの手法も取得率が下がっている。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 3(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。

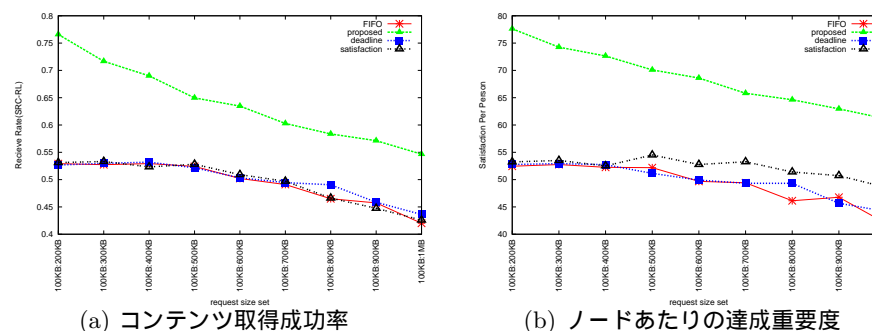


図 3 各環境における平均値

5.2.1 選択的アップロード機能の効果

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。

メッセージ取得成功率の結果

平均コンテンツ取得成功率を図 4(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。特に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候補のなかから配送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 の取得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 のリプライは宛先に送ることができているが、サイズが大きいほう (200KB ~ 1000KB) のリプライが、徐々に届けられなくなった結果だと考えられる。

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。もしノードの運搬するデータ複製量が、情報 BOX へのコンタクトタイム (到着時の 20 秒と出発時の 20 秒で 40 秒) で送信しきれない場合、Selection と Upload の性能はより悪化したと考えられる。

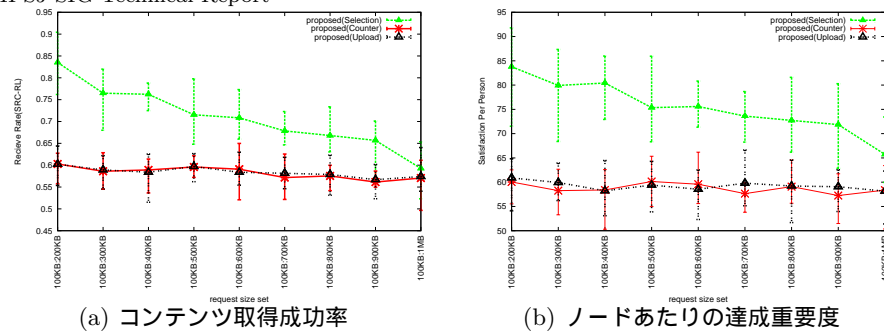


図 4 配送スケジュール最適化機能による影響 (平均値)

ノードあたり達成重要度の結果

各ノードの平均達成重要度の結果を 4(b) に示す。各手法の関係は、同様の傾向を示していることが確認できる。図 4(a) の到達率の関係と似ているが、これは到達率が高いほど、得られる重要度も高くなるからである。

しかし、100KB:1MB のとき、重要度は 5~10%程度の差があり、図 4(a) の到達率のときよりも若干高くなっている様子が確認できる。これは、選択的アップロード手法が情報 BOX にコンタクトしているノードが持つ複製データの候補の中で、最も重要度が高いデータを選択して受信する機能の効果だと考えられる。

6. ま と め

本稿では、PDA や携帯電話などの無線携帯端末を所持したユーザが、情報 BOX を介してコンテンツを取得するための、データの重要度と配送期限を考慮した DTN 経路制御手法を提案した。提案手法は、(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) コストパフォーマンス順のデータ送信、(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、消費通信帯域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を実現している。提案手法はメッセージ配送率が比較相手よりも 10%から 25%程度優れていることを確認した。また、達成した重要度においても、比較相手よりも 20%から 50%程度優れていることをシミュレーション実験により確認した。

参 考 文 献

1) Banerjee, N., Corner, M.D. and Levine, B.N.: An Energy-Efficient Architecture for DTN Throwboxes, *In Proc. IEEE INFOCOM*, pp.776-784 (2007).

2) Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *In Proc. the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications(SIGCOMM '03)*, pp.27-34 (2003).

3) Group, D.R.: <http://www.dtnrg.org/>.

4) Hui, P., Chaintreau, A., Scott, J., Gass, R., Crowcroft, J. and Diot, C.: Pocket switched networks and human mobility in conference environments, *In Proc. the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking(WDTN '05)*, pp. 244-251 (2005).

5) Jain, S., Fall, K. and Patra, R.: Routing in a delay tolerant network, *In Proc. the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications(SIGCOMM '04)*, pp.145-158 (2004).

6) Jones, E. P.C., Li, L. and Schmidtke, J.K.: Practical Routing in Delay-Tolerant Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.6, No. 8, pp.943-959 (2007).

7) project., T.H.: <http://www.haggleproject.org>.

8) project., T.W.: <http://www.wizzy.org.za/>.

9) Seligman, M., Fall, K. and Mundur, P.: Storage routing for DTN congestion control, *Research Articles, Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.7, No.10, pp.1183-1196 (2007).

10) UMassDieselNet.: <http://prisms.cs.umass.edu/dome/>.

11) Vahdat, A. and Becker, D.: Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks, Technical report cs-2000-06, Duke University (2000).

12) Wang, M. and Nahrstedt, K.: SOCIAL STRUCTURE BASED CONTACT INFORMATION, *In Proc. IEEE Military Communications Conference, 2008(MILCOM '08)*, pp.1-7 (2008).

13) Wang, Y., Jain, S., Martonosi, M. and Fall, K.: Erasure-coding based routing for opportunistic networks, *In Proc. the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking(WDTN '03)*, pp.229-236 (2005).

14) YasuhiroIshimaru, WeihuaSun, K. Y. M.I.: DTN-based Delivery of Word-of-Mouth Information with Priority and Deadline, *In Proc. The Fifth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010)* (2010).

15) Zhang, G., Wang, J. and Liu, Y.: Congestion management in delay tolerant networks, *In Proc. the 4th Annual International Conference on Wireless Inter-net(WICON '08)*, pp.1-9 (2008).

16) Zhao, W., Chen, Y., Ammar, M., Corner, M., Levine, B. and Zegura, E.: Capacity Enhancement using Throwboxes in DTNs, *In Proc. IEEE Intl Conf on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '06)*, pp.31-40 (2006).