

DTN 通信でのレスポンス送信アクセスポイント選択による 転送効率化手法

福田 諭^{1,a)} 梶岡 慎輔¹ 松尾 啓志¹

概要：スマートフォンなどのモバイル端末の普及により、様々な場所や場面でのインターネットアクセスの需要が増加している。しかし災害時や発展途上国など、通信インフラを利用できない状況では、インターネットアクセスを実現することはできない。そこで Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN) 技術を利用することで、より多くの場所や場面でインターネットアクセスを実現する手法が提案されている。DTN では、端末からのリクエストをマルチホップ無線通信とデータ運搬 (DTN ルーティング) によりインターネットに接続されたアクセスポイントへ転送する。サーバレスポンスは、一般には最初にリクエストを受信したアクセスポイントが DTN ルーティングにより端末へ配送する。しかしこの方法では、宛先端末に近いアクセスポイント以外へリクエストを転送する場合があります、このときレスポンスの配送遅延が増加するという問題が生じる。本稿では、適切なアクセスポイントがレスポンスを転送することで、レスポンスの配送遅延を削減する手法を提案する。計算機シミュレーションにより評価した結果、提案手法は既存手法と比べて、配送遅延を最大で 33%削減、配送率を最大で 28%向上できることを確認した。

1. はじめに

スマートフォンなどのモバイル端末の普及により、モバイル端末同士での無線アドホック通信を利用した情報共有が注目を集めている。モバイル端末同士のアドホック通信は、基地局などの通信インフラストラクチャを必要としないため、災害時や発展途上エリアなどの様々な場所や場面での利用が期待されている。しかし、モバイル端末同士のアドホック通信は、有線通信よりも低帯域であったり、モバイル端末の移動による頻繁なリンクの切断が起こりうるなどの問題があるため、遅延や途絶に耐性のあるネットワークの構築が必要となる。

Delay/Disruption/Disconnect Tolerant Networking (DTN) は遅延や途絶、不通に耐性のある通信を実現するための通信技術である [1][2]。DTN は極端に長い通信遅延時間や頻繁なパケットロスなど、従来の TCP/IP 通信が想定していない劣悪な条件での通信を現実的なコストで克服することを目指している。

本稿では、この DTN 技術を利用したインターネットアクセスに着目し、その転送効率を向上させる手法を提案する。DTN は遅延や途絶などに耐性があるため、通信イン

フラが未整備の地域でのサービスにも利用できると考えられる。中でも DTN を利用したインターネットアクセスサービスは、インフラが未整備の発展途上エリアや採掘現場などでのインターネットアクセスの実現や、都市などのインフラが整備されたエリアでも移動体通信事業者のトラフィックのオフロードなど様々な需要があると考えられる。そのため、インターネットアクセスサービスでの転送効率向上は有用であると考えられる。

これまで DTN 技術を用いたインターネットアクセスに関して様々な研究が行われてきた [3],[4],[5]。これらの研究では、端末が生成したリクエストをマルチホップ無線通信とデータ運搬 (DTN ルーティング) によりインターネットに接続されたアクセスポイント (以下 AP) へ転送し、その AP からサーバレスポンスを DTN ルーティングにより端末へ配送することで、インターネットアクセスを実現している。このようなインターネットアクセス実現法では、クライアントからのリクエストを最初に受信した AP のみがサーバレスポンスを受け取り、DTN ルーティングによりクライアントへ配送している。しかし、クライアントのリクエストが複数の中継端末を経由して AP に転送される場合には、リクエストを受信した AP とレスポンスの宛先端末が地理的に離れてしまい、結果としてレスポンスが生成されてから端末に配送されるまでの時間 (配送遅延) が増加し、多くの端末がそのレスポンスを保持、転送し続ける

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Aichi 466-8555,
Japan

^{a)} fukuda@matlab.nitech.ac.jp

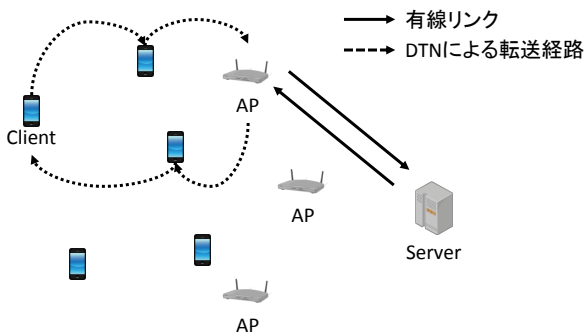


図 1 既存手法でのインターネットアクセス

という問題が生じる．本稿では，宛先端末への配送確率に基づき，サーバレスポンスを転送する AP を選択することで，レスポンスの転送効率を向上させる手法を提案する．

以降，2 章で関連研究である DTN 環境下での Web アクセスについて述べ，3 章で DTN 環境下での Web アクセスにおいて転送効率化を実現する手法について述べる．4 章で既存手法と提案手法の評価を行い，評価結果を考察する．最後に 5 章でまとめを行う．

2. 関連研究

本章では，本稿の提案手法のベースとなる DTN 環境下でのインターネットアクセス手法について説明し，その問題点について述べる．

2.1 概要

Pitkanen らは複数の AP が存在する状況下で，DTN ルーティングを利用したインターネットアクセス手法について提案している [3]．この手法では，図 1 に示すように，あるエリア内に複数の AP を設置し，各 AP はインターネットへアクセス可能とする．インターネットへデータを要求するクライアントノードは，DTN ルーティングによりデータのリクエストメッセージを転送する．リクエストメッセージを保持するノードが AP に接続した場合，そのノードは自ノードの保持するリクエストメッセージを AP に転送する．リクエストメッセージを受信した AP は，インターネット上のサーバからリクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージを取得し，DTN ルーティングにより，そのレスポンスメッセージをクライアントノードに配送する．既存手法では，以上のような動作により，クライアントノードが AP に接続していない状況でも，DTN ルーティングによりインターネット上のサーバとメッセージをやりとりすることができ，DTN 環境下でのインターネットアクセスを実現できる．このような DTN 環境下でのインターネットアクセスは，RSS フィードの受信や P2P ファイル受信，ブログへの投稿など比較的遅延に耐性のあるコンテンツでの利用に適していると考えられている．

2.2 既存手法のアーキテクチャ

Pitkanen らの手法では各ノードは常に移動し続ける状況を想定されており，AP に接続されていないノードが存在する．そのため，リクエストを送信するクライアントノードとインターネット上のサーバとの間でエンドツーエンドリンクを確立することができない場合がある．そこで，各ノードが DTN ルーティングによりメッセージの中継転送を行い，AP を介してインターネット上のサーバへリクエストを転送する．

各ノードはネットワーク層とアプリケーション層の間にバンドル層と呼ばれるエンドツーエンドでの通信を制御するオーバーレイレイヤを定義している．インターネットへのアクセスを必要とするアプリケーションは，このバンドル層にメッセージを登録することで，インターネット上のサーバへリクエストメッセージを転送，及びインターネット上のサーバからレスポンスメッセージを受信できる．このようにバンドル層は下層との間の吸収層としての役割を担う．このバンドル層の働きにより，例えば，ノード間通信での Bluetooth 等の省電力な近距離無線通信の利用や，AP とインターネット上のサーバとの間の TCP/IP による通信などを上層のアプリケーションは意識する必要がなくなる．

各ノードや，その上で動くアプリケーションは *Endpoint Identifiers* (EIDs) と呼ばれるノードもしくはアプリケーション固有の永続的な名前により識別される．EID は URI で記述され，ノードやアプリケーションの識別，宛先アドレスとして利用される．EID はワイルドカードをサポートしており，例えば `dtm:http://www.example.net/*` のようにデータを要求することで，ある宛先に属するすべてのデータを取得できる．

バンドル層に登録されるメッセージは可変長であり，送信元と宛先の EID，送信タイムスタンプ，シーケンス番号，有効期限，転送などを制御するいくつかのフィールド，そしてペイロードを保持する．なお上述の有効期限はホップ数ではなく実際の時刻を示す．各ノードのバンドル層に登録されるメッセージは送信元 EID とタイムスタンプ，シーケンス番号によって一意に識別される．

各メッセージは複数のメッセージを複合して一つのメッセージとして扱うことができる．この機能により，一つの Web ページ上に複数の画像や JavaScript，CSS 等のオブジェクトが埋め込まれている場合に，それらを複合して単一のメッセージとして扱うことができる．その他にもリクエストメッセージとサーバレスポンスを一つのレスポンスメッセージとしてバンドル層に登録することもできる．この機能は後述するキャッシュ機構で利用される．

DTN 環境下でのインターネットアクセスでは，クライアントプログラムは単一のリクエストをメッセージとしてバンドル層に登録し，そのメッセージをインターネット

上のサーバに転送する。リクエストメッセージを受信したサーバは、要求されたすべてのオブジェクトを単一のレスポンスメッセージとしてカプセル化し、リクエストメッセージの転送元 AP に転送する。レスポンスメッセージを受信した AP は、宛先ノードにレスポンスメッセージを配送する。なお、この時、このレスポンスメッセージの有効期限はリクエストメッセージの有効期限を設定する。レスポンスメッセージを受け取ったリクエストメッセージ送信元ノードのバンドル層では、レスポンスメッセージをデカプセル化し、個々のオブジェクトをクライアントプログラムに渡す。

2.3 既存手法でのルーティング

上述の通り、既存手法には以下の3種類のノードが存在する。

- モバイルノード
インターネットアクセスを要求する DTN ノード。
- サーバ
インターネット上のサーバ。
- AP
固定回線に接続されておりインターネット上のサーバと通信が可能な DTN ノード

すべての AP は固定回線に接続されており、任意の AP がインターネット上のサーバを宛先とするメッセージのデフォルトゲートウェイとして振る舞うことができる。既存手法でのルーティングは、固定回線に接続された AP とインターネット上のサーバ間の一般的なルーティング、モバイルノードと AP 間の DTN ルーティングの2つに分けられる。

2.3.1 固定回線に接続されたノード間のルーティング

固定回線に接続されたノード間では、静的ルーティングを適用する。リクエストメッセージを転送する AP は、リクエストの宛先サーバと直接接続を確立する。宛先サーバはリクエストメッセージの宛先 EID を参照することで知ることができる。

2.3.2 モバイルノードと AP 間のルーティング

モバイルノードと AP 間のルーティングには Direct Delivery と Spray and Wait Routing, Epidemic Routing の3つのうちのいずれかを利用する。Direct Delivery は他のノードがリクエストメッセージを中継せず、AP に直接接続した場合のみ転送する方式である。Spray and Wait Routing[6] はメッセージ作成時に、その複製の最大数を指定し、メッセージを複製する際に複製元ノードと複製先ノードで複製の最大数を分割することで、メッセージの複製数を制限するルーティング方式である。Epidemic Routing[7] はノードが別のノードに接続した際に、一方が持っているメッセージを全て他方に複製し、メッセージの複製を拡散させることで宛先ノードにメッセージを配送するルーティ

ング方式である。これらの3つのルーティングプロトコルはいずれもステートレスであるため、接続履歴などのノード状態に依存せず、素早いメッセージ配送が期待できる。

2.4 キャッシュ機構

DTN 環境では、メッセージの転送は Store Carry Forwarding 方式でバンドル層に保持される。Store Carry Forwarding 方式では、メッセージは TTL が期限切れになるか、ノードのストレージ容量が飽和するまで保持される。既存手法では2.2節で述べたように、サーバレスポンスをそれに対応するリクエストメッセージと複合して、一つのレスポンスメッセージとしてバンドル層に登録する。これらのメッセージは DTN ルーティングにより複数のノード間で複製される。既存手法では、このノードのストレージに保持されるレスポンスメッセージをキャッシュとして利用する。

各ノードはリクエストメッセージを受信した際に、宛先 EID 等の情報を解析し、そのリクエストメッセージに適合するレスポンスメッセージが自ノードのバンドル層に保存されているかどうかを調べる。もし、該当するレスポンスメッセージが存在する場合、その宛先 EID 等の情報をリクエストメッセージの送信元ノードの情報に書き換え、そのレスポンスメッセージを転送する。

このキャッシュ機構は HTTP 等のプロトコルでは有用な方法である。多くの HTTP のレスポンスはリクエストを送信したノードに依存しないため、ノードのストレージに保存されているレスポンスメッセージのキャッシュから、リクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージを生成することができる。もちろん、Cookie 等の情報を利用してリクエストに関しては、このキャッシュ機構を利用することはできない。

既存手法では以上で説明したキャッシュ機構をモバイルノード及び AP に実装することで、レスポンスメッセージの配送率向上及び配送遅延削減を実現している。

2.5 既存手法の問題点

既存手法では、リクエストメッセージを受信したアクセスポイントが、レスポンスメッセージを DTN ルーティングにより宛先ノードへ配送する。しかし、リクエストメッセージが複数ノードを中継されて転送された場合には、リクエストメッセージを送信したノードが、リクエストメッセージを受信する AP から地理的に離れてしまう場合がある。このようにレスポンスメッセージを転送する AP とその宛先のノードとの位置が離れてしまうと、レスポンスメッセージが多くのノードで中継転送されることになる。その結果、レスポンスメッセージが宛先ノードに届くまでの配送遅延が増加してしまう。レスポンスメッセージの配送遅延の増加は、サービスの品質に大きな影響を与えるた

め、配送遅延の削減手法が必要であると考えられる。

3. 提案手法

本章では、エリア内に存在する複数の AP から、レスポンスメッセージを転送する AP を適切に選択することにより、レスポンスメッセージの転送効率を向上させる手法について説明する。

既存手法では、リクエストメッセージを最初に受信した AP がレスポンスメッセージを転送していた [3]。しかしリクエストメッセージが複数のノードを中継して転送された場合には、リクエストメッセージの送信ノード、つまりレスポンスメッセージの宛先ノードがリクエストメッセージを最初に受信した AP と地理的に離れてしまっている状況が存在し、レスポンスメッセージの配送率や配送遅延が悪化するという問題があった。

そこで本稿では、サーバからのレスポンスメッセージを転送する AP を、宛先ノードへの配送確率に基づき選択する手法を提案する。提案手法では、AP とインターネット上のサーバとの間に Proxy サーバを設置する。その Proxy サーバが AP から転送されてきたリクエストメッセージを宛先のサーバに転送し、リクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージを適切な AP に転送する。提案手法では、リクエストメッセージを受信した AP ではなく、レスポンスメッセージが宛先ノードに配送される確率の高い AP がレスポンスメッセージの転送を担うため、提案手法の利用によりレスポンスメッセージの配送率の向上及び、配送遅延の削減が期待できる。ノード同士、あるいは各ノードと AP との配送確率は、ノード間リンク確立時に随時更新されている。レスポンスメッセージ転送時に配送確率を参照することで、宛先ノードの最新の配送確率に基づく AP 選択が可能となる。これにより、既存手法のように、リクエストメッセージを受信した AP とレスポンスメッセージの宛先ノードが地理的にかげ離れており、レスポンスメッセージの配送が非効率な状況を改善できると考えられる。

また提案手法では、ノードの移動による配送確率の変化に追従するため、レスポンスメッセージの宛先ノードへの配送確率が変化した場合に、より配送確率の高い AP へレスポンスメッセージを複製する。ノードの移動に伴い、AP と宛先ノードとの配送確率も変化する。各 AP から宛先ノードへの配送確率も時間の経過とともに変化する。そこで提案手法では、配送確率が変化し、宛先ノードへの配送確率が最も高い AP が替わった場合には、配送確率の最も高くなった AP に対して、レスポンスメッセージの複製を転送する。これにより、時間経過に追従したレスポンスメッセージ転送 AP 選択を実現する。

以降で提案手法におけるレスポンスメッセージ転送 AP 選択について説明する。

3.1 提案手法におけるノード間配送確率算出

提案手法では AP と各ノードとの間の配送確率算出が必要となる。ノード間の配送確率算出手法には後述する PRoPHET Routing や、その改良版である PRoPHET v2 Routing などがある。提案手法では、後者の PRoPHET v2 Routing を採用し、AP と各ノードとの間の配送確率算出に利用する。

提案手法では、PRoPHET v2 Routing に基づき、各ノードは他のノードと接続した際に、自ノードと接続したノードとの配送確率を更新する。AP も同様に他のノードと接続した場合に、配送確率の情報を更新し、更新した配送確率情報をインターネット上の Proxy サーバに伝える。

以上の動作により、提案手法ではインターネット上の Proxy サーバがエリア内の AP とノードとの配送確率情報を保持し、この配送確率情報を基にレスポンス転送 AP を選択する。

3.1.1 PRoPHET Routing

PRoPHET Routing [8] はノード間の配送確率を計算することで、メッセージの転送効率化を実現するルーティング手法である。

PRoPHET では、以下の動作により、ノード間の配送確率を更新する。ここで $P(A, B) \in [0, 1]$ はノード A におけるノード B との配送確率を表す。初期状態では、すべてのノード間の配送確率は P_{init} で初期化される。ノード A がノード B に接続した場合にはノード A におけるノード B との配送確率 $P(A, B)$ を以下の式に従って更新する。

$$P(A, B) = P(A, B)_{old} + (1 - P(A, B)_{old}) \cdot P_{init}$$

この更新により、より頻繁に出会うノード間の配送確率は大きく設定される。またノード A はノード B にメッセージを複製することでノード B を経由して別のノード C とも中継転送できると考えられるため、以下の式に従って配送確率を更新する。

$$P(A, C) = P(A, C)_{old} + (1 - P(A, C)_{old}) \cdot P(A, B) \cdot P(B, C) \cdot \beta$$

ここで、 β はメッセージ中継が配送確率に与える影響を示す定数である。PRoPHET では 2 つのノードが一定時間接続しない場合に、その 2 ノード間の配送確率を以下の式に従ってエージングする。

$$P(A, B) = P(A, B) \cdot \gamma$$

ここで、 γ はエージング間隔あたりの配送確率の減衰量を示す定数である。

以上の動作により、PRoPHET では各ノード間の配送確率を更新することができる。

3.1.2 PRoPHET v2 Routing

PRoPHET Routing の配送確率算出を改良した手法

である PProPHET v2 Routing[9] も提案されている。PProPHET Routing では、ノード間の接続間隔を考慮していないため、例えば逆方向に進む 2 つのノードが接続した場合でも、2 ノード間の配送確率を高く更新してしまう。この場合、2 つのノードは離れていくため、2 ノード間の配送確率は高く設定するべきではないにも関わらず、PProPHET Routing ではこれを高く設定してしまうという問題がある。

PProPHET v2 Routing はノード間の接続間隔を考慮することで、この問題を解決する。PProPHET v2 Routing ではノード A がノード B に接続した場合にはノード A におけるノード B との配送確率 $P(A, B)$ を以下の式に従って更新する。

$$P(A, B) = P(A, B)_{old} + (1 - P(A, B)_{old}) \cdot P_{enc}$$

$$P_{enc} = \begin{cases} P_{enc_max} & (interval(A, B) \geq I_{typ}) \\ P_{enc_max} \cdot interval(A, B) / I_{typ} & (interval(A, B) < I_{typ}) \end{cases}$$

ここで P_{enc_max} は配送確率の初期値であり、 $interval(A, B)$ はノード A とノード B が最後に出会ってからの経過時間、 I_{typ} は 2 つのノード間の標準的な接続間隔である。PProPHET v2 Routing では以上の式により、 I_{typ} 以内に 2 つのノードが接続する場合には、頻繁に接続していると判断して、配送確率を上昇させる。逆に I_{typ} 以内に接続していないノード同士が接続した場合には、配送確率を高くならないように設定する。このような動作により、接続間隔を考慮して配送確率を更新する。

3.2 提案手法の動作

提案手法でも既存手法と同様に、DTN ルーティングによって各ノードはリクエストメッセージを AP に転送する。各ノードは他のノードや AP と接続した場合には、メッセージの他に先述した配送確率の情報も交換する。AP がリクエストメッセージを受信した場合には、AP はインターネットに接続された Proxy サーバにそのリクエストメッセージを転送する。リクエストメッセージを受信した Proxy サーバは、リクエストメッセージの宛先のサーバに対してリクエストを転送し、対応するレスポンスを受信する。そしてもとのリクエストメッセージの送信ノードを宛先とするレスポンスメッセージを作成する。最後に、AP と宛先ノードとの配送確率を参照し、そのレスポンスメッセージの宛先ノードへの配送確率が最も高い AP に対して、レスポンスメッセージを転送する。レスポンスメッセージを受信した AP は、DTN ルーティングにより、そのレスポンスメッセージを宛先ノードへ配送する。

またレスポンスメッセージは、AP における宛先ノードへの配送確率が変化した場合にも、Proxy サーバから AP に

表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	設定値
シミュレーション時間	43200 秒
シミュレーション空間	4500 × 3400[m ²]
モバイルノード数	120 台
AP 数	8 台
インターネット上のサーバ	1 台

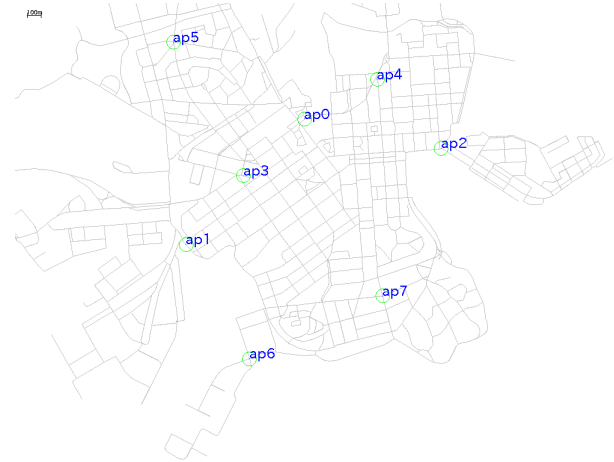


図 2 AP の配置

転送される。Proxy サーバの保持するレスポンスメッセージの中で、宛先ノードへの配送確率の最も高い AP が変化したレスポンスメッセージは、最も配送確率の高くなった AP に複製を転送される。

以上の動作により、提案手法では、レスポンスメッセージの宛先ノードの移動に追従するレスポンスメッセージ転送 AP 選択を実現する。

4. 評価

提案手法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションによる評価実験を行った。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションには DTN シミュレータである The Opportunistic Network Environment simulator (The ONE) 1.4.1 [10] を利用した。シミュレーションパラメータを表 1 に示す。各ノードは初期状態では、シミュレーション空間上にランダムに配置される。シミュレーションが開始されると各ノードはランダムに目的地を決定し、その目的地へ道路にそって最短経路で移動する。ノードが目的地に到着すると、120 秒間待機した後、再び別の目的地を決定して移動を繰り返す。

各 AP は図 2 のように、シミュレーション空間上に経験則に基づき、ノードとの接続確率の高い場所に配置した。

モバイルノードは 0.5 ~ 1.5[m/s] で動くノードを 80 台と、2.7 ~ 13.9[m/s] で動くノードを 40 台の計 120 台を配

表 2 提案手法での配送確率算出パラメータ

パラメータ	設定値
初期配送確率 P_{enc_max}	0.5
標準接続間隔 I_{typ}	1800 秒
中継転送確率係数 β	0.9
エージング間隔	5 秒
エージング係数 γ	0.999885791

置している．これら 2 種類のノードは歩行者と自動車に対応するものである．

各 AP とインターネット上のサーバは 512[MBytes] のストレージを持ち，100[Mbps] の固定回線に接続されている．モバイルノードは DTN ストレージとしてバンドル層に 10 ~ 50[MBytes] のストレージを持ち，モバイルノード同士，モバイルノードと AP は通信可能範囲 50[m]，実効通信速度 30[Mbps] の無線通信インターフェースを持つ．無線通信インターフェースのスキャン間隔は 0.1 秒とし，ノード同士が互いに通信可能範囲に入った場合には即座に通信を開始できる．

本評価実験では HTTP 通信を想定したアプリケーションの評価を行った．各モバイルノードは一定間隔でリクエストメッセージを生成し，バンドル層に登録する．リクエストメッセージがインターネット上のサーバに転送されると，インターネット上のサーバはリクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージを生成し，AP に転送する．各モバイルノードは 280 ~ 320 秒ごとにリクエストメッセージを送信し，各リクエストメッセージのサイズは 1 ~ 50[KBytes] に設定した．

提案手法の配送確率算出に利用するパラメータを表 2 に示す．提案手法では，2.7 ~ 13.9[m/s] で移動する自動車に対応する 40 台のノードは配送確率の計算から除外している．これら 40 台のノードは比較的速く移動するため，短い時間間隔で複数のアクセスポイントの近辺に移動すると考えられる．そのような場合，多くのアクセスポイントが比較的高い配送確率を示すようになり，配送確率に基づく AP 選択の効果が現れにくいと考えられるためである．また配送確率情報は最大でも 1[KBytes] に満たないため，ノード接続時に交換されるものとする．

評価実験では，クライアントノードが送信したリクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージをクライアントノードが受け取った割合を示すレスポンスメッセージ配送率，返ってきたレスポンスメッセージの配送遅延を計測した．最大レスポンスメッセージサイズを 1000 ~ 5000[KBytes]，モバイルノードのストレージ容量を 10 ~ 50[MBytes] でそれぞれ変化させた．図 3 から図 8 のグラフに示す結果はそれぞれ 5 回のシミュレーションの平均値である．

4.2 評価結果

レスポンスメッセージ配送遅延の評価結果を図 3，図 4，図 5 に，レスポンスメッセージ配送率の評価結果を図 6，図 7，図 8 にそれぞれ示す．グラフの横軸はモバイルノードのストレージ容量，縦軸はそれぞれレスポンスメッセージ配送遅延，レスポンスメッセージ配送率である．

評価結果よりレスポンスメッセージサイズを大きくする，もしくはモバイルノードのストレージ容量を小さくするにつれて，レスポンスメッセージの配送遅延及び配送率が悪化していることが確認できる．レスポンスメッセージサイズが大きい場合やモバイルノードのストレージ容量が小さい場合，各ノードが保持できるレスポンスメッセージ数が減る．各ノードは新しいメッセージを受信する際にストレージが不足している場合，古いメッセージから順に削除される．その結果レスポンスメッセージが複数の中継ノードを経由される確率が減少すると考えられる．そのため，レスポンスメッセージが AP 近辺の狭い範囲に留まり，宛先ノードまでレスポンスメッセージが到達しにくくなると考えられる．逆に，レスポンスメッセージサイズが小さい場合やモバイルノードのストレージ容量が大きい場合，各ノードが保持するレスポンスメッセージ数が増え，古いメッセージが長期にわたり転送されるため，レスポンスメッセージが複数の中継ノードを経由される確率が增加すると考えられる．そのため，レスポンスメッセージが AP 近辺だけでなく広い範囲に拡散され，多くのレスポンスメッセージが宛先ノードに到達したと考えられる．

図 3，図 6 や図 4，図 7 でのノードのストレージ容量が 30,40,50[MBytes] の結果を見ると，提案手法は既存手法と比べて平均配送遅延が最大で約 7%，配送率が最大で約 4%悪化している．これらの提案手法が悪化している結果はレスポンスメッセージのサイズが小さい，もしくはノードのストレージ容量が大きいケースである．このようなケースでは，たとえ宛先ノードへの配送確率が高くない AP にレスポンスメッセージを転送したとしても，レスポンスメッセージが広い範囲に拡散されるため，宛先ノードへ配送できたと考えられる．以上のことから，レスポンスメッセージサイズが小さく，ノードが十分なストレージ容量を持っているような環境では，レスポンスメッセージ転送 AP 選択を行わなくとも，レスポンスメッセージが広い範囲に拡散するため，提案手法の効果が現れにくいと考えられる．

それに対して図 4，図 7 でのノードのストレージ容量 10,20[MBytes] や図 5，図 8 を見ると，提案手法は既存手法と比べ，平均配送遅延が最大で約 33%削減され，配送率が最大で約 28%向上されていることが確認できる．これらの提案手法の効果が現れている結果は，上述の提案手法の効果が現れないケースとは逆の，レスポンスメッセージのサイズが大きい，もしくはノードのストレージ容量が小さ

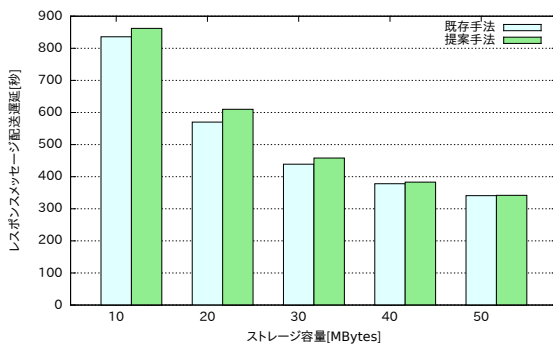


図 3 レスポンスメッセージ配送遅延
 (レスポンスメッセージサイズ 1000KBytes)

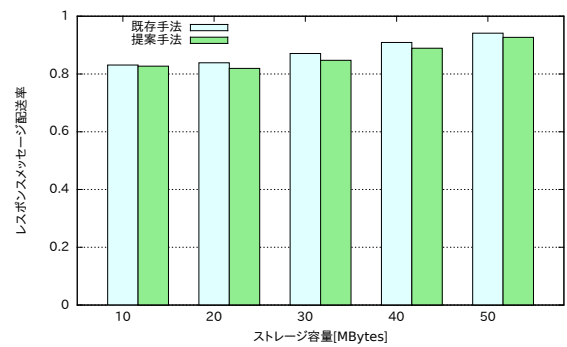


図 6 レスポンスメッセージ配送率
 (レスポンスメッセージサイズ 1000KBytes)

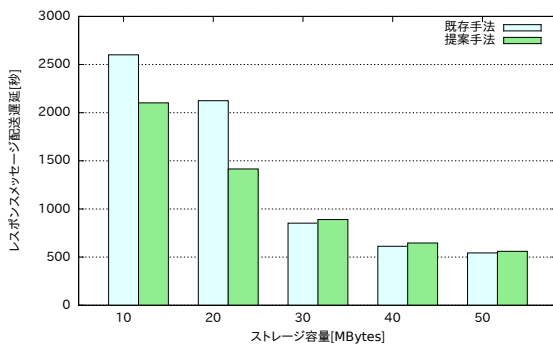


図 4 レスポンスメッセージ配送遅延
 (レスポンスメッセージサイズ 3000KBytes)

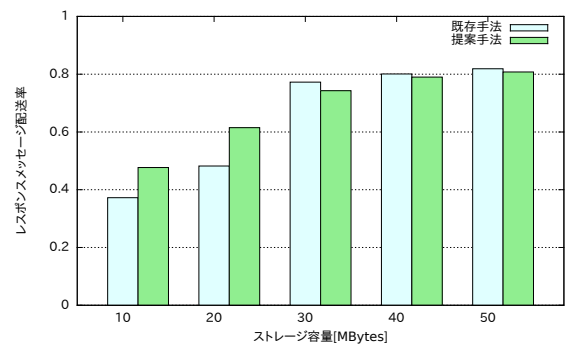


図 7 レスポンスメッセージ配送率
 (レスポンスメッセージサイズ 3000KBytes)

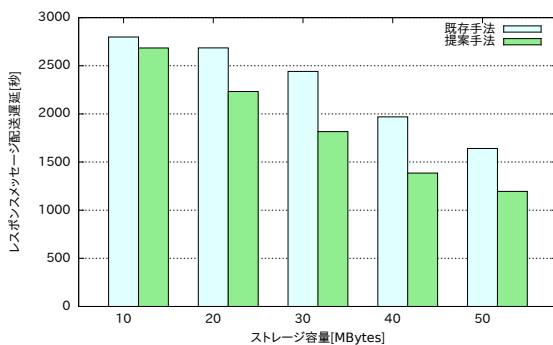


図 5 レスポンスメッセージ配送遅延
 (レスポンスメッセージサイズ 5000KBytes)

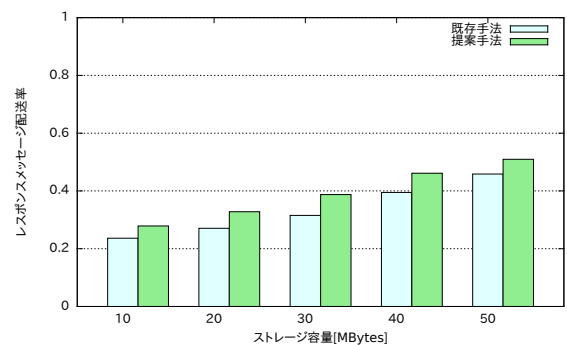


図 8 レスポンスメッセージ配送率
 (レスポンスメッセージサイズ 5000KBytes)

いケースである。このようなケースでは、レスポンスメッセージは、レスポンスメッセージ転送 AP 近辺の狭い範囲のみに留まる。既存手法ではレスポンスメッセージは対応するリクエストメッセージを受信した AP に転送される。リクエストメッセージが複数の中継ノードを経由して転送される場合には、リクエストメッセージを送信したノードとリクエストメッセージを受信した AP の距離が離れてしまう。地理的に離れた AP の近辺にリクエストメッセージに対応するレスポンスメッセージが留まってしまうと、結果としてレスポンスメッセージが宛先ノードに届く可能性が低くなる。既存手法では以上のような要因により、レスポンスメッセージのサイズが大きい、もしくはノードのストレージ容量が小さいケースでは、レスポンスメッセージ

の配送率、配送遅延が悪化したと考えられる。それに対し、提案手法ではレスポンスメッセージは、その宛先ノードへの配送確率が最も高い AP に転送される。宛先ノードへの配送確率が高いほど AP から宛先ノードへの距離および配送時間が短いと考えられる。よって、仮にレスポンスメッセージが AP 近辺の範囲に留まったとしても、宛先ノードもその近くに存在する可能性が高いため、レスポンスメッセージの配送率の向上及び配送遅延の短縮を実現できたと考えられる。

以上の結果より、提案手法はレスポンスメッセージのサイズが大きいアプリケーションや、ノードのストレージ容量が小さい環境では、配送率の向上、配送遅延の短縮に有効であると結論付けられる。

既存手法では、クライアントから要求されたオブジェクトすべてを複合し単一のレスポンスメッセージとして、クライアントノードに配送している。このように複数のオブジェクトを複合したレスポンスメッセージのサイズは、一般的に大きくなると考えられる。またワイルドカードなどを使用してデータを取得した場合も、レスポンスメッセージサイズが増加すると考えられる。そのため、提案手法は既存手法の想定しているアプリケーションにおいて特に有効に動作すると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、DTN 環境でのインターネットアクセスにおいて、宛先ノードへの配送確率に応じてレスポンスメッセージを転送するアクセスポイントを選択することで、配送遅延の削減及び配送率の向上を実現する手法を提案した。

提案手法を計算機シミュレーションにより評価したところ、リクエストメッセージを受信したアクセスポイントがレスポンスメッセージを転送する既存手法よりも、配送遅延が最大で 33%削減され、配送率が最大で 28%向上されていることを確認した。

今後の課題としては、モバイルノードのストレージ容量を増加させた場合の配送率、配送遅延の変化を確認し、提案手法の効果が現れないケースにおける提案手法の振舞いの分析や、さらなる配送遅延の削減、配送率向上に寄与するレスポンスメッセージ転送方式の提案などが挙げられる。

参考文献

- [1] Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K. and Weiss, H.: “Delay-Tolerant Networking Architecture” (2007). RFC 4838.
- [2] Scott, K.: “Bundle Protocol Specification” (2007). RFC 5050.
- [3] Pitkanen, M., Karkkainen, T. and Ott, J.: “Opportunistic web access via WLAN hotspots”, *Proceedings of IEEE Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 20–30 (2010).
- [4] Ott, J. and Kutscher, D.: “Bundling the Web: HTTP over DTN”, *WNEPT Workshop* (2006).
- [5] Ott, J. and Kutscher, D.: “Applying DTN to Mobile Internet Access: An Experiment with HTTP”, Technical report, Universität Bremen (2005).
- [6] Spyropoulos, T., Psounis, K. and Raghavendra, C. S.: “Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks”, *Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking*, pp. 252–259 (2005).
- [7] Vahdat, A. and Becker, D.: “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks”, Technical report, Duke University (2000).
- [8] Lindgren, A., Doria, A. and Schelén, O.: “Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks”, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 7, No. 3, pp. 19–20 (2003).
- [9] Lindgren, A., Doria, A., Davies, E. and Grasic, S.: “Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Con-

- nected Networks” (2012). RFC 6693.
- [10] Kernen, A., Ott, J. and Krkkinen, T.: “The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation”, *Proceedings of International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUtools)* (2009). <http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/>.