遅延時間インセンシティブなコンテンツ配信のための巡回型移動体ノードを組み込んだ Opportunistic Network 構成法と位置依存型フォワーディング知識

岡本一晃† 高見一正†

近年、地域及び時間に限定されたコンテンツ（例えば、地域新聞、工事情報、チラシ広告など）が電子化され、配信されることが一般的になってきている。これらのコンテンツをサーバで集中管理し、広域ネットワークを経由して配信する方法は広範囲、遠距離に対して送信する場合は効率が良いが、地域を限定して送信する場合は広域ネットワークを経由するオーバーヘッドの割合が大きくなる。本稿では、位置情報を利用してフォワーディング知識を定義し、巡回型移動体ノードを中継してコンテンツを特定の地域で配信する方法を提案する。具体的には、各巡回型移動体ノードにフォワーディング知識としてカバーエリアを定義し、そのカバーエリアの比較により宛先へ転送を行う方式を提案した。また、提案機能を組み込んだ Opportunistic Network エミュレータを試作し、到達率と遅延時間を Epidemic Routing と比較して評価を行った。

Opportunistic Network Construction Method Incorporating a Cyclic Mobile Node and Forwarding Knowledge Depending Positional Information For Distributing Contents that are Insensitive to Delay

KAZUAKI OKAMOTO† KAZUMASA TAKAMI†

1. はじめに

近年、紙媒体で配布されていたコンテンツがデジタル化されつつある。具体的な例としては新聞、チラシ広告などが挙げられる。人手による紙媒体の配布では人件費や印刷費などのコストがかかることから、デジタル新聞、メールマガジン、クーポンサイトなどが登場した。通常、これらのコンテンツはメールサーバや HTTP サーバから配信される。遠距離で広範囲なコンテンツ配信においては効率が良い。しかし、特定の地域、特に送信者近辺の地域のみ有効であるようなコンテンツ配信においては、広域ネットワーク、メールサーバ、データセンターなどを経由するオーバーヘッドの割合が大きくなる。

一方、劣通信環境下でも高い到達率を誇る通信方式として、DTN(Delay-/Disruption- Tolerant Network)[1]-[6]の研究が盛んに行われている。DTN はノード自身の移動による運搬とマルチホップ無線通信による蓄積運搬形転送を特徴とし、大幅な遅延やネットワークの断絶があった場合でも転送が可能になる。DTN の中でも偶発的接触によってメッセージ転送を行う方式を Opportunistic Network[7]-[10]と呼ぶ。Opportunistic Network の研究では転送の際に判断基準とする知識（以下、これをフォワーディング知識と呼称する）を定義するものが多い。

†創価大学大学院工学研究科情報システム工学専攻
Graduate School of Engineering Soka University

本稿では、位置情報に依存したフォワーディング知識と巡回型移動体ノードを定義し、巡回型移動体ノード同士の転送によって特定の地域まで遅延時間の影響の少ないコンテンツを転送する Opportunistic Network を構成する手法を提案する。コンテンツ配信においては、不特定多数の端末に対して送信することを目的とするため、宛先は IP アドレスなどの識別子ではなく GPS システムによる位置情報を基に定義する。巡回型移動体ノードは送信端末からのコンテンツ配信要求を受けて、コンテンツを受け取り、巡回型移動体ノード同士の蓄積運搬形転送によってコンテンツを宛先まで転送する。その後、宛先上で受信端末に複製転送を行い、受信端末同士の伝搬によってコンテンツの到達率を向上させる。巡回型移動体ノード同士の転送は本稿で提案するフォワーディング知識に従うものとする。

本稿の構成は以下のようになっている。第 2 章では、関連研究とその問題点を示し、提案方式との違いを示す。第 3 章では、想定する利用場面を記述した。第 4 章では、提案する巡回型移動体ノードの定義、フォワーディング知識の定義、送信端末から巡回型移動体ノードへの送信処理、巡回型移動体ノード間の転送処理、巡回型移動体ノードから受信端末への受信処理について提案する。第 5 章では、提案方式を実装した試作システム、Opportunistic Network エミュレータの構成と到達率、遅延時間の測定項目定義、および、評価結果を示す。第 6 章では、まとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

DTN では、固定ルートを移動し蓄積運搬形転送を専門に行うノードを定義したメッセージフェリー方式[5]が存在する。メッセージフェリーを活用した研究ではバッファ使用量の削減と高い到達率を実現している。メッセージフェリーはクラスタ（ノードの集まりやすい場所）を経由する際にクラスタ内のノードからメッセージを受信し、他のクラスタに存在するノードへメッセージを転送する方式である。メッセージフェリー方式はセンサノードの情報収集への活用は数多く研究されている。しかし、情報の配信についての検討は行われていない。

DTN の代表的なルーティング方法として Epidemic Routing[6]が挙げられる。Epidemic Routing は接触した全ノードに対して複製転送を行うことで、到達率を最大限まで上げる方式である。その反面、大量のフラッディングメッセージを送信するため、全ノードのバッファと電池残量の消費が大きくなる。そのため、Opportunistic Network の多くの研究ではフォワーディング知識を活用することで、ネットワーク内の不要な転送を抑制し Epidemic Routing のような無差別なブロードキャスト方式に比べて転送・蓄積量の大幅な短縮に成功している。

文献[8]では、ノードの移動速度と移動方向をフォワーディング知識とした転送方式 MoVe(the Motion Vector scheme)が定義されている。宛先の位置を特定できることを前提とし、自分よりも宛先により高速に接近するノードに対して転送を行う。これにより、使用バッファサイズを低く抑えることに成功している。しかし、本方式は全ノードが移動速度と移動方向を判断基準として転送を行うため、転送までの計算量が多い。また、移動方向は不確定であり、転送時は宛先へ向かっていたとしてもそのまま宛先に接触するまで直進することを保証できない。

3. 想定する利用場面

本稿におけるコンテンツは、次のような性質を前提とする。受信対象となる端末は送信者近郊に存在し、数時間から数日程度の範囲の遅延に対しても十分な価値を持つものとする。また、不特定多数の端末を受信対象とし、一部不到達の端末があった場合でも影響が小さいものとする。具体的な例を以下に挙げる。

一つの例として、地域限定広告、または、店舗限定広告が挙げられる。図 1 のように学生をターゲットとしている飲食店からバスに自社のコンテンツ（広告情報など）の配信を要求する。コンテンツを受信したバスが他のバスとのマルチホップ通信によって大学付近までコンテンツを運搬し、大学周辺を経由する時にコンテンツを配信する。

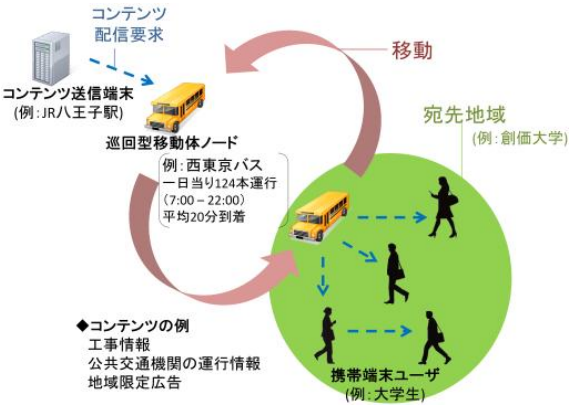


図 1 利用場面例

Figure 1 Example of use scene

また、バスや電車の遅延・運転見合わせ、工事による道路の一時通行止めのような公共性の高い情報の周知も挙げられる。電車の遅延・運転見合わせ情報は多くの人がアクセスするため、一時的にアクセス数が増加してサーバに過負荷がかかり接続しづらくなることがある。そうした情報を Opportunistic Network で配信することで、サーバの負荷の軽減が期待できる。また、工事による道路の一時通行止め情報は事前に配信することで発生する渋滞を緩和することに繋がる可能性がある。

4. 巡回型移動体ノードによる転送方式

4.1 Opportunistic Network 構成法

本稿で構成する Opportunistic Network は、図 2 のようにコンテンツの送受信を行う端末と、コンテンツの運搬、配信を行う巡回型移動体ノードで構成される。端末は携帯電話やスマートフォンを想定し、巡回型移動体ノードは電車やバスなどの公共交通機関に蓄積運搬形転送を実装したものを想定する。また、端末と巡回型移動体ノード共に GPS 情報を取得可能とする。

宛先指定方法は端末を一意に表すアドレスではなく、GPS 上の位置指定で行う。宛先の形式は位置情報による中心座標と半径で表される円形の範囲指定とし、範囲内に存在する全端末を受信対象とする。以降これを宛先エリアと呼称する。

宛先までコンテンツを複製転送する過程で不要な転送によるメッセージの著しい増加を抑制する必要がある。そのため、図 3 のように送信端末から宛先エリアまでを巡回型移動体ノードのみで転送し、宛先エリア上で巡回型移動体ノードが受信端末へコンテンツを配信する方式を提案する。転送と複製転送は転送後にそのパケットをバッファから削除するかしないかという点で異なる。バッファから削除する場合が転送で、削除しない場合が複製転送とする。端末と巡回型移動体ノードは後述のフォワーディング知識に従い転送を行う。

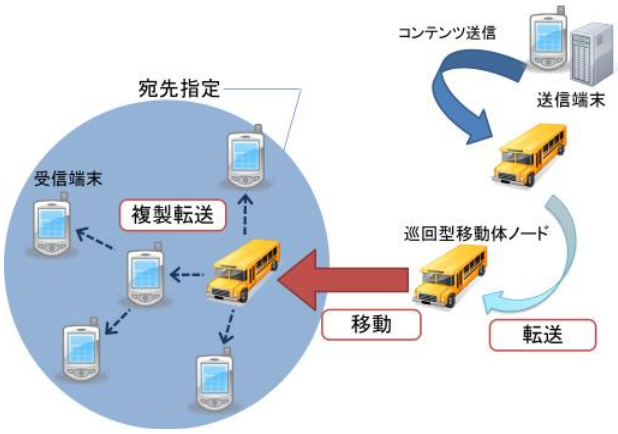


図 2 Opportunistic Network 構成例

Figure 2 Example of configuration of an Opportunistic Network

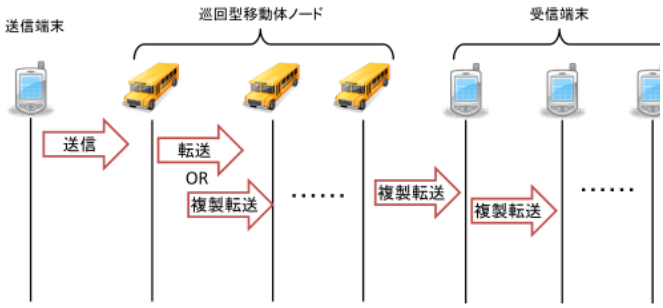
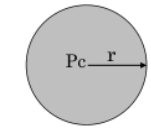


図 3 Opportunistic Network 全体のメッセージシーケンス例

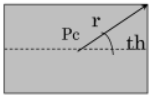
Figure 3 Example of message sequence in the Opportunistic Network

4.2 位置依存型フォワーディング知識

巡回型移動体ノードは固定ルートを移動するため、巡回型移動体ノードがワンホップで配信可能な範囲は特定される。そのため、移動速度や移動方向ではなく巡回型移動体ノードの移動範囲を利用する。巡回型移動体ノードの移動範囲に関するフォワーディング知識をカバーエリア、共有カバーエリアとし、GPS で取得可能な位置情報によって表現される図形として定義する。また、宛先エリアは図 4 に示すような、円形や矩形を想定している。図形の内部に存在する全端末が受信対象となる。中心点は GPS で取得可能な緯度、経度情報である。ただし本稿では円形についてのみ議論する。



Pc ： カバーエリアの中心点	[double x, double y]
r ： カバーエリアの半径	[int r]



Pc ： カバーエリアの中心点	[double x, double y]
r ： カバーエリアの対角線の半長	[int r]
th ： 長方形の対角線と緯度線の成す角度	[double theta]

図 4 宛先エリアの形式例

Figure 4 Examples of destination area formats

カバーエリアと共有カバーエリアは、どちらも巡回型移動体ノードが所有する情報で、中心座標と半径で表現される円形の形式とする。カバーエリアは巡回型移動体ノードの移動軌跡を内包する最小の円として定義され、各々で固有に持つ。カバーエリアの生成アルゴリズムについて記述する。まず、巡回型移動体ノードが固定ルートを巡回中に、移動ルートを一周するまで一定時間ごとに位置情報を取得する。図 5 のように、その中で最も離れている二点を選び、二点の線分を直径とするような円をその巡回型移動体ノードのカバーエリアとして定義する。カバーエリアは自身が通信可能な範囲を便宜的に示す。

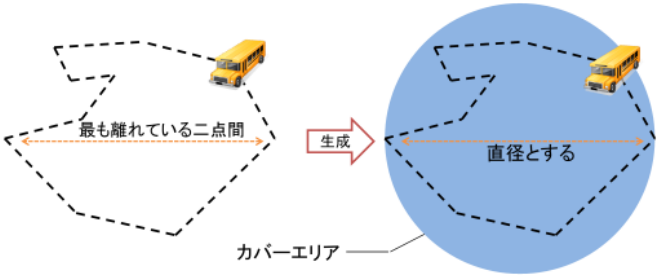


図 5 カバーエリアの定義例

Figure 5 Example of definition of Coverage Area

共有カバーエリアは巡回型移動体ノードのカバーエリアで初期化される。巡回型移動体ノード同士が接触するたびに双方の共有カバーエリアを統合し、接触する巡回型移動体ノードが増えるたびに範囲が大きくなる。共有カバーエリアは巡回型移動体ノードがマルチホップで送信可能な範囲を便宜的に示す。図 6 にカバーエリアと共有カバーエリアの例を示す。

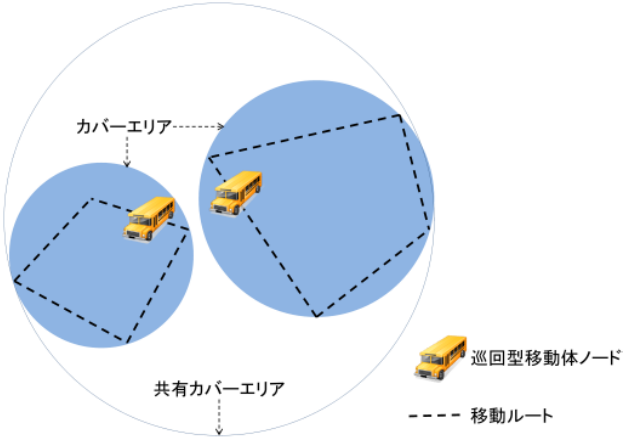


図 6 共有カバーエリアの例

Figure 6 Examples of shared coverage area

カバーエリアと共有カバーエリアは巡回型移動体ノードが配信可能な領域を強制的に円形に変形しているため、図 7 のように本来ならばパケットの配信が不可能な領域を内包してしまう。本稿ではこの領域をデッドエリアと呼ぶ。送信端末と巡回型移動体ノードはカバーエリア、共有カバーエリアを基準に送信や転送を行うかどうかを判断するため、本来ならば送信不可能な場合でもパケットを受け取ってしまう可能性がある。

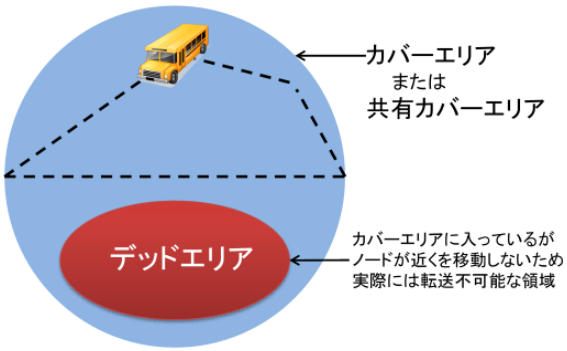


図 7 デッドエリアの例

Figure 7 Example of “dead area”

4.3 端末から巡回型移動体ノードへの送信処理

送信端末が巡回型移動体ノードにコンテンツを送信する際、巡回型移動体ノードが宛先まで到達する可能性があることを事前に確認する必要がある。そのため、以下に示すやりとりを行う。

Step1. 巡回型移動体ノードは他のノードとの接触を検知するために周期的に図 8 に示す Hello message をブロードキャストする。

Step2. Hello message を受信した送信端末は、Hello message の共有カバーエリア内に、送信するコンテンツの宛先が含まれていることを確認する。

Step3. 宛先が共有カバーエリア内に存在することが確認できた場合、図 8 に示す Packet header を付与したパケットに整形して巡回型移動体ノードへ送信を行う。

Step4. 受信した巡回型移動体ノードは ACK message を返す。

図 8 の Packet header 内の送信元識別子はそのコンテンツの送信端末の一意の識別子（例として MAC アドレス）を指定する。シーケンス番号はコンテンツの重複受信を防ぐ目的で、自身が送信したコンテンツに一意の番号を付与するものとする。巡回型移動体ノードは送信端末からのコンテンツを受信する際、送信元識別子とシーケンス番号が同一のものが既にバッファに存在する場合は受信しない。TTL(Time To Live)はパケット廃棄のタイミングを日付と時刻で設定したものである。ACK message は受信が正常に完了を通知するためのメッセージである。

Hello message

メッセージ識別子 (1Byte)
カバーエリア (20Bytes) {double x, double y, ULONG radius}
共有カバーエリア (20Bytes) {double x, double y, ULONG radius}

Packet header

メッセージ識別子(1Byte)
宛先指定(20Bytes) {double x, double y, ULONG radius}
送信元識別子(MACアドレス : 6Byte)
シーケンス番号(4Byte)
TTL(8Byte)

ACK message

メッセージ識別子 (1Byte)
送信元識別子(MACアドレス : 6Byte)
シーケンス番号(4Byte)

図 8 各メッセージフォーマットの例

Figure 8 Examples of each message format

4.4 巡回型移動体ノード同士の転送処理

巡回型移動体ノード同士の転送では、カバーエリアの比較を行い、宛先エリアに近づくことを基準に転送するかどうかを判断する。しかし、相手巡回型移動体ノードの方が宛先エリアより離れていた場合でも、宛先エリア上を移動する場合は転送を行う。また、TTL が現在時刻に近いものは優先的に転送を行う。以下の流れで転送処理を行う。

Step1. 巡回型移動体ノードは周期的に Hello message をブロードキャストする。

Step2. 接触した相手巡回型移動体ノードと同期をとり 1 つずつパケットを転送し合う。送信時は、TTL が現在の日付に近いパケットを選択し Step3 へ移る。

Step3. 相手のカバーエリアの方が宛先エリアに距離的により近い、または、宛先エリアとカバーエリアが重複している場合、パケットを転送して Step4 に移る。そうでない場合は Step5 に移る。

Step4. 受信端末が返す ACK message を確認した後、自分のカバーエリアと宛先エリアが重複していない場合はパケットをバッファから削除する。一定時間到達が確認できない場合は通信断絶と判断する。

Step5. 全パケットへの処理が終わるかリンクが断絶するまで Step2 に戻り繰り返す。

4.5 巡回型移動体ノードから端末への送信処理

巡回型移動体ノードがあるパケットの宛先エリア上を移動している間は接触した端末全てがそのパケットの宛先であるため、それらに対して転送する必要がある。宛先エリア上の端末にパケットを転送する可能性がある限りそのパケットを保持する必要がある。そのため、受信端末への転送はすべて複製転送とし、パケットを保持している巡回型移動体ノードはそのパケットの TTL を過ぎるまで保持する。

巡回型移動体ノードによる転送のみでは宛先エリア内の特定の端末のみが受信するため、受信端末同士でも転送を行う必要がある。そのため、端末所有者の移動を利用してパケットを受信した端末も宛先エリア上を移動している間はすれ違った端末に対して複製転送を行う。宛先エリア外に移動した場合はそれ以降転送を行わない。図 9 に巡回型移動体ノードからパケットを受信した端末の挙動を示す。

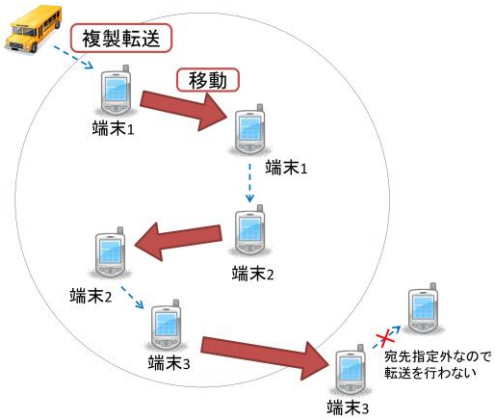


図 9 受信端末の挙動例

Figure 9 Example of behavior of terminals that received packets

5. 評価

5.1 評価システム試作

本学で開発された MANET エミュレータ[11]を蓄積運搬形転送が行えるように改変し、Opportunistic Network エミュレータを試作した。4 章で提案した方式を Opportunistic Network エミュレータに実装した。開発環境は Visual Studio 2010 Express、OS は Windows 7 Professional を使用した。

MANET エミュレータから Opportunistic Network エミュレータへの変更点を示す。エミュレーションモジュールや仮想 IP アドレスなどの機能はそのまま使用し、上位層である AODV 実装部を書き換えて DTN のバンドル層処理を実装した。バッファは動的配列を用いることで実装し、巡回型移動体ノードと端末の挙動は初期化ファイルで設定できるように実装した。また、4 章で提案した方式をアプリケーション部に実装した。図 10 にソフトウェア構成図を示す。

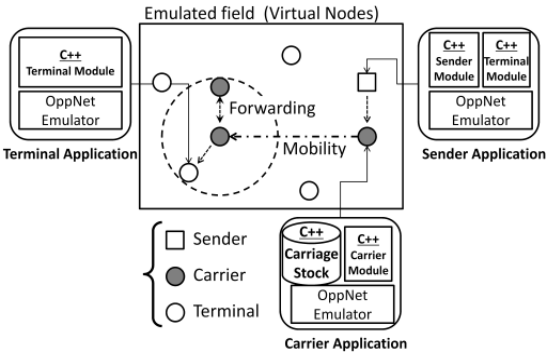


図 10 ソフトウェア構成図

Figure 10 Software structure of the developed system

5.2 評価条件

表 1 に示す条件で評価を行った。エミュレーションするフィールドサイズは 3km×5km で、評価時間は 1 時間とした。巡回型移動体ノードの台数を 1 台から 5 台まで 1 台ずつ増やしていき、その状態での到達率、遅延時間で評価を行った。端末の位置、送信端末の宛先などは全てランダムに決定されるものとする。端末は到達率計測の都合上、初期化された位置から移動せず静止するように設定した。

表 1 評価条件

Table 1 Measurement conditions

項目	設定
試行回数	各 5 回
フィールドサイズ	3km × 5km
評価時間	1 時間
伝搬範囲	全て半径 100m
端末配置	ランダムに散布
端末数	200 台(静止)
送信端末数	内 10 台
宛先エリア	中心座標、半径共にランダムな円形
再送回数	2 回まで
巡回型移動体ノード	1~5 台
巡回型移動体ノード移動速度	約時速 20 km
ペイロード長	1Kbytes

巡回型移動体ノードは図 11 に示す移動ルートを巡回するように設定した。八王子駅北口から創価大学正門までを巡回する、西東京バスの「創価大学循環」をモデルとした。巡回型移動体ノード 5 台と移動ルートの対応は表 2 に示すように設定した。評価の中で生成されるパケットの数は試行回数 5 回×送信端末数 10 台の 50 パターン存在する。その中で巡回型移動体ノードに一回も送信されなかったものは評価の対象から外す。評価の対象となったパケットの宛

先エリアを図 12 に示す。

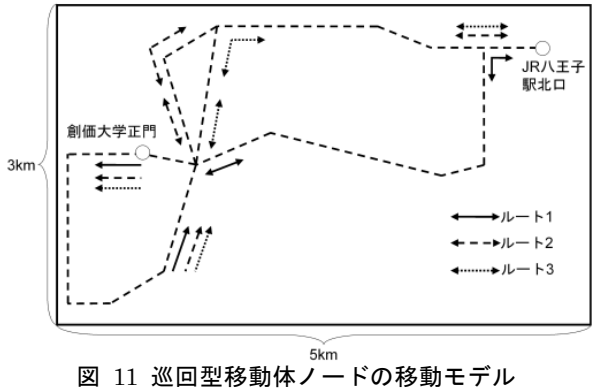


図 11 巡回型移動体ノードの移動モデル
Figure 11 Cyclic mobile nodes' movement models

表 2 巡回型移動体ノードの移動ルート対応表
Table 2 List of a cyclic mobile node and the movement model

巡回型移動体ノード	図 11 の移動ルート	初期位置
1 台目	ルート 1	JR 八王子駅北口
2 台目	ルート 2	JR 八王子駅北口
3 台目	ルート 3	JR 八王子駅北口
4 台目	ルート 1	創価大学正門
5 台目	ルート 2	創価大学正門

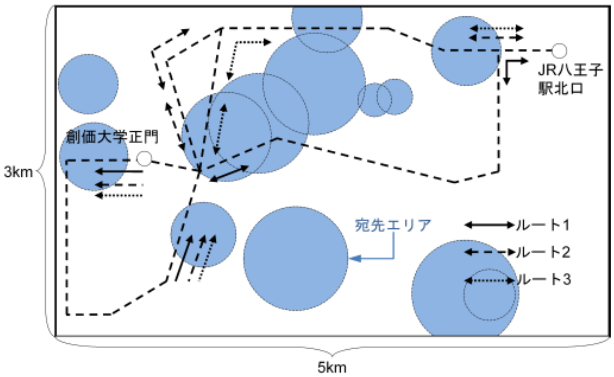


図 12 評価に使用したランダムな宛先エリア例
Figure 12 Example of destination areas which are randomly generated and used for measurement

5.3 端末ごとの到達率と宛先エリアごとの到達率

到達率は端末到達率と宛先エリア到達率の二種類を定義した。端末到達率は宛先エリア内にいる全端末の内、パケットを受信した端末の割合を全パケットで平均したものとする。宛先エリア到達率は全パケットの内、宛先エリア上の端末に到達したものの割合とする。上記の二つの到達率を提案方式と Epidemic Routing で比較した。端末到達率を図 13、宛先エリア到達率を図 14 にそれぞれ示す。

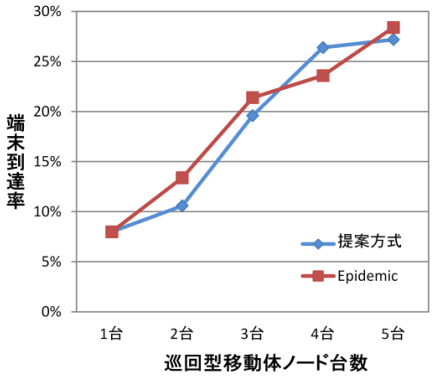


図 13 各巡回型移動体ノード台数における端末到達率
Figure 13 Packet reaching probability each terminal

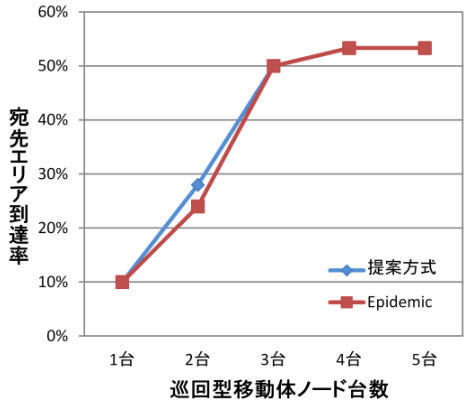


図 14 各巡回型移動体ノード台数における宛先エリア到達率
Figure 14 Packet reaching probability each packet's destination area

端末到達率は 25%以上、宛先エリア到達率は 50%以上と、提案方式と Epidemic Routing 両方とも同程度となった。Epidemic Routing は全ノードに対して複製転送を行うため、同じ条件下での到達率は理論上最大値になる。そのことから、提案方式は相対的に見て十分な到達率に達しているといえる。両方式で到達率が全体的に低くなる原因として、単位面積当たりのノードの密度が 13 台/km^2 と低く、携帯端末に見立てた通常ノードの間でリンクが十分に張れていないことが原因と考えられる。しかし、エミュレータの性質上、同時に大量のエミュレーションを実行するために計算能力の高い PC が必要となる。

また、提案方式については 4 章で提案したカバーエリア方式で内包されるデッドエリアによる誤送信が考えられる。カバーエリア内に含まれるが、デッドエリアであるためにどの巡回型移動体ノードでも実際には送信不可能なものを評価結果から取り除いて再度評価した。結果得られたグラフを図 15 に示す。グラフから、提案方式のカバーエリアでは実際に配信不可能なパケットも受け取っていることが確認された。配信不可能なパケットを完全に遮断できれば端末到達率でもある程度高くなることが確認できた。

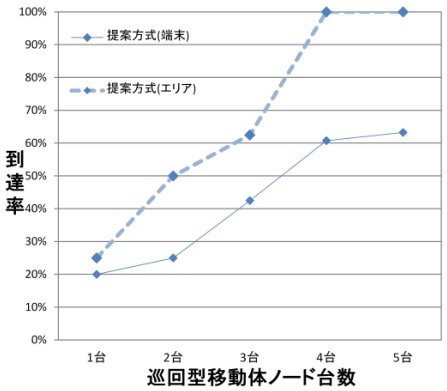


図 15 到達不可能なパケットを取り除いた到達率

Figure 15 Packet reaching probability without unreachable packets

5.4 平均到達遅延

遅延時間はパケットが送信端末から巡回型移動体ノードに転送されてから受信端末に到達するまでの時間の平均で計算した。到達しなかったパケットについては評価時間の一時間を代入した。遅延時間のグラフを図 16 に示す。巡回型移動体ノードの台数が増加するにつれ到達遅延が小さくなっていることがわかる。特に 1 台目と移動ルートが同じで初期位置が異なる 4 台目が加わってから到達遅延が約 20 分まで短縮されている。巡回型移動体ノードの巡回周期が平均で約 40 分前後であるため、巡回型移動体ノードの巡回周期の約半分に当たる。

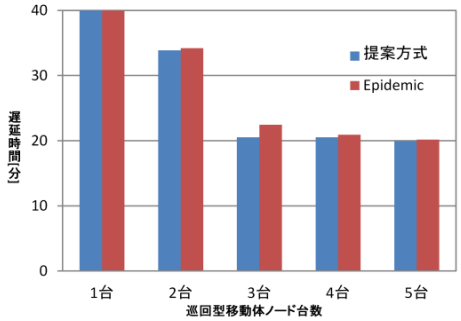


図 16 各巡回型移動体ノード台数における平均到達遅延

Figure 16 Average of delay time during forwarding

6. 終わりに

本稿では、巡回型移動体ノードを組み込んだ Opportunistic Network を構成し、遅延時間の影響が小さいコンテンツを配信する手法を提案した。位置情報による宛先指定方式を用いることで局地的なコンテンツの配信方法を提案した。カバーエリア、共有カバーエリアを定義することで Epidemic Routing に比べて不要な転送を削減する方法を提案した。

また、本学で開発された MANET エミュレータを改造して Opportunistic Network エミュレータを試作し、端末到達率、宛先エリア到達率、遅延時間の観点から Epidemic Routing と比較して評価を行った。評価結果から Epidemic Routing と同等の到達率と到達遅延を達成することができた。

今後の課題として、以下の三点が挙げられる。一点目に、ノード数を増加させた時の評価結果の取得である。そのためには試作システムではなく Space-Time Engineering 社が提供する Scenargie シミュレータを使用する予定である。二点目に、他の情報をフォワーディング知識として利用することが挙げられる。これについては、巡回型移動体ノード同士の接触するタイミングやバッファサイズを考慮するなどの方法を検討している。三点目に、パケットが到達可能かどうかをより正確に判断するために、フォワーディング知識として挙げたカバーエリアをより柔軟な形式に改良することである。一例として、経由する交差点(Waypoint)とそれらを結ぶ直線によって構成されるカバーエリアを検討中である。

参考文献

[1]. 鶴正人, 内田真人, 滝根哲哉 他 “解説誌 DTN 技術の現状と展望”, 解説論文

[2]. V. N. G. J. Soares, F. Farahmand, and J. J. P. C. Rodrigues, “A layered architecture for Vehicular Delay-Tolerant Networks,” *2009 IEEE Symp. Comput. Commun.*, pp. 122–127, Jul. 2009.

[3]. P. Ramanathan and a. Singh, “Delay-Differentiated Gossiping in Delay Tolerant Networks,” *2008 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3291–3295, 2008.

[4]. P. Sok and K. Kim, “Distance-based PRoPHET routing protocol in Disruption Tolerant Network,” *2013 Int. Conf. ICT Converg.*, pp. 159–164, Oct. 2013.

[5]. W. Zhao and M. H. Ammar, “Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks”, *Ninth IEEE Work. Futur*, 2003.

[6]. A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially connected ad hoc networks,” 2000.

[7]. C.-M. Huang, K. Lan, and C.-Z. Tsai, “A Survey of Opportunistic Networks,” *22nd Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. - Work. (aina Work. 2008)*, pp. 1672–1677, 2008.

[8]. J. LeBrun and D. Ghosal, “Knowledge-Based Opportunistic Forwarding in Vehicular Wireless Ad Hoc Networks,” *2005 IEEE 61st Veh. Technol. Conf.*, vol. 4, pp. 2289–2293.

[9]. L. Pelusi, A. Passarella, and M. Conti, “Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks,” *Commun. Mag. …*, no. 027918, pp. 1–10, 2006.

[10]. S. Biswas and R. Morris, “ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks”, *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, pp. 133–143, 2005.

[11]. 笠松大祐, 河田広次, 岡田大樹篠宮紀彦, “アドホックネットワークサービスプログラムの試験用エミュレータ,” *IEICE*, vol. VolJ92-B N, pp. pp.667–677, 2009.