

MANETにおける位置情報マルチキャストルーティング MgCastの性能評価と応用に関する検討

水本 明[†] 山口 弘 純[†]
廣森 聡 仁[†] 谷口 健 一[†]

本稿では、モバイルアドホックネットワークにおいて、移動端末の位置情報を利用するマルチキャストプロトコル *MgCast* を提案する。モバイルアドホックネットワークにおける多くのマルチキャストプロトコル同様、*MgCast* は経路探索メッセージを用い、オンデマンドで地理的領域群で指定される宛先領域への経路木を構築する。プロトコルのオーバーヘッドをなるべく抑えるため、*MgCast* は次の2つの方針を採用している。(1) 各移動端末は、自身の位置情報と、各々の隣接する端末群の位置情報を把握しているものとし、宛先領域により近い定数個の隣接端末を経路探索メッセージの受信端末として指定し、送信する。指定されたそれらの端末のみがそのメッセージを転送することで、メッセージ数を抑えることができる。(2) 宛先領域が複数である場合、不要なデータパケットの複製を軽減するため、なるべく共有木が構築されるよう各端末が転送先を工夫する。この構築は自律分散的に行われるため、ある特定の端末が構築木を明示的に計算する必要はない。シミュレーションによる性能評価の結果、*MgCast* は経路発見率、経路探索メッセージ数、経路木のコストの観点からみて、適切なバランスを達成していることがわかった。

MgCast – Cost Conscious Geographic Multicast on MANET

AKIRA MIZUMOTO HIROZUMI YAMAGUCHI AKIHITO HIROMORI
KENICHI TANIGUCHI

In this paper, we propose a location-aware multicast protocol on MANET called *MgCast*. As in many other MANET protocols, *MgCast* follows an on-demand routing tree construction approach by route query messages. Our main idea for cost-conscious tree construction consists of the following two principles. (i) Assuming that each node knows only the neighbor nodes' location information, *MgCast* lets the node forward route query messages only to a specific number of the neighbor nodes which are closer to the destination area. This simple idea can avoid redundant route query messages (non-data packets) while keeping reasonable route discovery ratios. (ii) If there exist multiple destination areas, shared trees are constructed to reduce the redundant duplication of data packets. Since the construction is done in a decentralized manner, no explicit tree computation at a certain node is required. As well as the above cost savings, the operations such as routing table management and tree recovery are designed to complete the protocol. The experimental results have shown that *MgCast* could achieve a good balance between route discovery ratios and the number of messages, saving tree costs.

1. はじめに

近年、無線通信技術の発達や携帯端末の普及により、モバイルアドホックネットワーク (MANET) とよばれる新しい無線ネットワークモデルが注目を集めている。MANETとは、アクセスポイントなどのインフラストラクチャを必要とすることなく、移動端末を用いて、一時的かつ、動的に構築されるネットワークである。MANETでは、各端

末がルータの様に振舞うことでマルチホップネットワークを形成し、通信距離を広げることできるが、その際には、有線ネットワーク同様ルーティングが必要となる。有線ネットワークと異なり、MANETを構成する端末は頻りに移動や参加・離脱等を行うと考えられるため、ネットワークトポロジも頻りに変更される。従ってパケット送信開始時に、オンデマンドで経路を構築する方法が多く用いられる。その際の経路構築には、一般的に経路探索メッセージのフラッディングが用いられるが、フラッディングでは全ての端末にメッセージが転送されるため、端末の消費電力や帯域占有の観点から望ましくない。

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 コンピュータサイエンス専攻
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

これに対し、近年、端末の位置情報を利用して経路探索のメッセージ数を削減する位置情報ルーティングが提案されてきている^{1)~8)}。例えば、フィールドゲームやオリエンテーリングなどにおけるデータ配信では、特定の地域に位置する移動端末を保持したユーザへのデータ配信を行う機会も多い。位置情報ルーティングでは宛先端末と自端末の位置関係から、どの端末がメッセージを転送すべきが決定される。

本稿では、MANETにおける位置情報マルチキャストルーティングプロトコル *MgCast* を提案する。MANETにおける他の多くのマルチキャストプロトコル同様、*MgCast* は経路探索メッセージを用いて、オンデマンドで地理的領域群で指定される宛先領域への経路木を構築する。プロトコルのオーバーヘッドをなるべく抑えるため、*MgCast* は次の2つの方針を採用している。(1) 各移動端末は、自身の位置情報と、各々の隣接する端末群の位置情報を把握しているものとし、宛先領域により近い定数個の隣接端末を経路探索メッセージの受信端末として指定し、送信する。指定されたそれらの端末のみがそのメッセージを転送することで、メッセージ数を抑えることができる。(2) 宛先領域が複数である場合、不要なデータパケットの複製を軽減するため、なるべく共有木が構築されるよう各端末が転送先を工夫する。この構築は自律分散的に行われるため、ある特定の端末が構築木を明示的に計算する必要はない。シミュレーションによる性能評価の結果、*MgCast* は経路発見率、経路探索メッセージ数、経路木のコストの観点からみて、適切なバランスを達成していることがわかった。

2. 関連研究

MANETにおける、位置情報を利用した経路構築手法が提案されてきている^{1)~8)}。例えば文献5)では、全端末の位置情報を用いて、MANETでの効率よいマルチキャスト配送木を構築する手法を提案している。しかし各端末が全端末の位置情報を把握しておく必要があるため、この手法は比較的小規模のMANET向けに設計されたプロトコルである。文献7)、8)では、領域を分割し、分割された各小領域(セル)に空間内の全ての端末の位置情報を把握する代表端末を設け、経路探索をセルの代表端末間のみで分散的に行うことで経路探索のメッセージ数を軽減する手法を提案している。しかしこの手法は、スケーラビリティに優れる一方で、代表者の選出などのオーバーヘッドが存在する。文献6)では、特定地域に位置する端末群へのマルチキャスト経路を非集中型で構築するLocation Based Multicast(LBM)を提案している。この手法は、文献3)で提案されているLocation Aided Routing(LAR)

と本質的に同じである。LBMの各端末は転送領域とよばれる領域を宛先領域と自端末の位置から計算し、その領域内に位置する端末のみがメッセージを転送する。この方法ではフラッディングに比べ、メッセージ数をかなり削減することができるが、宛先領域までの経路発見率はネットワーク空間中の端末密度率に依存する。

我々が提案する *MgCast* の各端末は、宛先領域に近い定数個の端末を経路探索メッセージの受信端末として指定し送信する。*MgCast* の送信端末は、隣接端末群が自身より宛先領域までの地理的な距離が遠い端末のみである場合も、それらを経路メッセージ受信端末として指定し送信することにより、迂回経路が発見しやすい特性がある。さらに、宛先領域が複数ある場合、不要なデータパケットの複製を軽減するため、なるべく共有木が構築されるよう各端末が転送先を工夫する方針も採用している。これにより *MgCast* は経路発見率、経路探索メッセージ数、経路木のコストの適切なバランスを達成する。

3. 前提条件と *MgCast* の概要

3.1 前提条件

各端末は、一意の識別子(ID)を保持しているとする。また各端末はGPSを搭載しており、自身の位置情報(緯度経度情報)を取得できるとする。さらに、各端末は各々の隣接する(互いの無線範囲に存在する)端末群のIDと位置情報を把握できるものとする。これらの情報は、*hello message* と呼ばれるメッセージを用いて定期的に交換する。なお、各端末の無線範囲は等しいものとし、端末間通信は双方向通信であるとする。

端末間通信は、ブロードキャスト型を仮定する。すなわち、一回のメッセージ転送により自身の隣接端末群にメッセージが配送される。

3.2 *MgCast* の概要

我々の目的は、複数の宛先領域に対する、コストの小さい(リンク数の少ない)経路木を少ない経路探索メッセージで構築する分散プロトコルを提案することである。そこで、与えられた宛先領域群に対し、共有木を構築するよう工夫する。データ送信元端末は、同方向(端末からみて一定角度内)の宛先領域群をグループ化(宛先領域群を1個以上のグループに分割)し、各グループに対する経路探索メッセージの転送先を自身の隣接端末からそれぞれ選択する。この際、グループ化した宛先領域群の中心となる地点を計算し、その地点により近い定数個の隣接端末を選択する。ここで、各宛先グループに対し経路探索メッセージを作成するのではなく、宛先グループと選択した隣接端末の組それぞれを、1つの経路探索メッセージに付加し、ブロードキャストする。メッセージ中に自身の識別

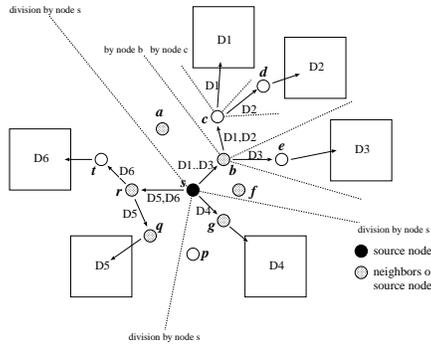


図 1 MgCast における経路探索プロセス

子が付加されていると判断した受信端末も同じプロセスを行う。このプロセスが繰り返されることで、やがて各宛先領域内に位置する端末に経路探索メッセージが到達し、データ送信元端末から宛先領域群への木状の経路が構築される(図 1 に例を示す)。宛先領域外に位置する端末からの経路探索メッセージを受信した宛先領域内に位置する端末が返信メッセージを送信する。返信メッセージは、その経路を通りデータ送信元端末に配送され、共有木が構築される。共有木の管理方法の詳細は、次章で述べる。

形式的には以下ようになる。データ送信元端末 s が、宛先領域群内に位置する端末群へ送信したい場合、端末 s は経路探索メッセージを自身の隣接端末にブロードキャストする。その際に宛先領域群に対し、なるべく共有木を構築するため上述のように同方向の宛先領域群をグループ化し、各グループに対する経路探索メッセージの転送先を自身の隣接端末から適切な定数個の端末を選択する。この目的のため、 s は宛先領域群のグループと隣接端末群の組を 1 つ以上作成する。この組を“転送端末 - 宛先領域ペア”(“ $ND\text{-group}$ ”)とし、“ $\{n_1..n_k : D_1..D_m\}$ ”の型式で表される(n_i は s の隣接端末、 D_j は宛先領域を表す)。 s は作成した各 $ND\text{-group}$ を経路探索メッセージに付加し、ブロードキャストする。ある端末 u が自身の隣接端末から経路探索メッセージを受信し、自身がそのメッセージの $ND\text{-group}_i$ 中に記されてあれば、 $ND\text{-group}_i$ 中の宛先領域群に対し、新たに $ND\text{-group}$ 集合を作成し、作成した集合を付加した経路探索メッセージをブロードキャストする。

4. MgCast のプロトコル記述

4.1 メッセージフォーマット

図 2 に経路探索メッセージと返信メッセージのフォーマットを示す。

まず、これらのメッセージに共通するフィールドについて説明する。 $type$ フィールドはこのメッセージの型(経路

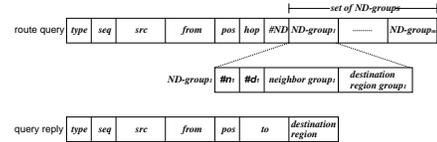


図 2 メッセージフォーマット

探索または返信)を表し、 seq フィールドは各端末が同じ内容のメッセージを不要に転送することを防止するためのメッセージのシーケンス番号である。 src フィールドはデータ送信元端末の ID を格納し、 $from$ フィールドはこのメッセージを返信してきた隣接端末の ID を格納する。 pos フィールドは $from$ に記されている隣接端末の現在の位置を格納する。

経路探索メッセージにおいて、 $\#ND$ は $ND\text{-group}$ 集合の要素数を表す。各 $ND\text{-group}_i$ は宛先領域グループと、そのグループに対する経路探索メッセージの転送先隣接端末グループを表し、宛先領域グループ中の要素数 $\#d_i$ 、転送先隣接端末グループ中の要素数 $\#d_i$ を含む。返信メッセージにおいて、 to はこのメッセージの受信先端末の ID を表し、 $destination\ region$ は、この返信メッセージが生成された宛先領域を表す。

4.2 ルーティングテーブル

MgCast における各端末は、ルーティングテーブルを保持する。テーブルの各エントリは、 $\langle src, dst, from, to, metric, flag, lifetime \rangle$ の 7 字組である。 src はデータ送信元端末の ID、 dst は宛先領域の ID、 $from$ はデータパケットを転送してきた隣接端末の ID、 to はデータパケットの転送先端末の ID、 $metric$ はデータ送信元端末から自身までの経路のメトリック(例えばホップ数)、 $flag$ はこのエントリが有効であるか否かを示す論理変数、 $lifetime$ はこのエントリの残り生存時間を表す。ルーティングテーブルは経路探索メッセージや返信メッセージを転送する際にエントリの追加や更新が行われる。また、 $lifetime$ が 0 になったエントリはテーブルから削除される。

4.3 経路探索

以下、 s はデータ送信元端末、 $D_1, D_2 \dots D_n$ は宛先領域(面積がおおよそ均一な多角形)を表すものとし、一般性を失うことなく D_i と D_{i+1} は図 1 のように互いに隣接しているものとする。宛先領域 D_i に対し、その中心は容易に算出できると仮定し、それを c_i で表す。

4.3.1 宛先領域群の分割

データ送信元端末 s は、宛先領域の集合 $\{D_1..D_n\}$ を宛先領域群の集合 $\{dset_1..dset_m\}$ に分割する(図 3 に例を示す)。ここで、 $\bigcup_i dset_i = \{D_1..D_n\}$ かつ、 $dset_i \cap dset_j = \emptyset$ とする。次に端末 s は、 $ND\text{-group}_i$ ($nset_i : dset_i$) を作成するために、 $dset_i$ に k 個の隣接端末 $nset_i$ を割り当

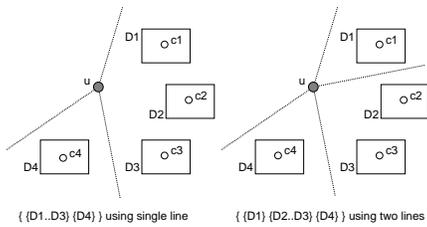


図 3 宛先領域群の分割例

でる．ここで、 k はプロトコルの定数であり、転送先隣接端末数と呼ぶ．端末 s の各隣接端末は、受信した経路探索メッセージの ND-group 集合のいずれかに自身が含まれているか判断する．含まれていなければメッセージを捨てる．ND-group $ND_i = \{nset_i : dset_i\}$ 中に含まれていれば、 $dset_i$ を同じ手続きでより小さいグループに分割し、新しい ND-group の集合を生成する．

以下にこの手続きを一般化する．ある端末 u が、経路探索メッセージを受信し、そのメッセージの ND-group $\{nset : dset\}$ 中に自身の ID が記されているとする． $dset = \{D_1..D_m\}$ に対して、端末 u は、最大 $m - 1$ 本の線を用いて、宛先領域をグループ化する全ての分割方法を中心 $c_1..c_m$ の位置から算出する．なおこの分割方法は、総計 $\sum_{0 \leq i \leq m-1} m C_i$ 通りある．ここで、各分割方法のコストは、データ送信元端末の隣接端末から宛先領域群へのユークリッド距離の総和とする．分割方法 $\{dset_1...dset_p\}$ のコストは以下で表される．

$$\sum_{0 \leq i \leq p} \sum_{D_j \in dset_i} d_{v,c_j}$$

ここで、 v は u の隣接端末を表し、 d_{v,c_j} は v と c_j のユークリッド距離を表す．

図 4 に例を示す．端末 u は、 $dset_1 = D_1..D_3$ に対する中心地 c_1, c_2, c_3 への総距離が最小である端末 a を選択する．この方法で、端末 u は経路木のコストが最小である分割方法を決定することができる．

端末 u は最適な分割方法 $\{dset_1...dset_p\}$ とそれぞれに対応した隣接端末を決定した後、 $k > 1$ であれば、さらに各グループに対して $k - 1$ 個の隣接端末を選択し、追加する．その選択方針を次に述べる．

各 $dset_i$ と選択された隣接端末 v_i に対して、端末 u は、 v_i の方向を 0 度とみなし、角度 2θ 毎に無線範囲を分割する (図 4)．角度 $(2h-1)\theta$ と $(2h+1)\theta$ ($h = -\lfloor \frac{\pi}{2\theta} \rfloor .. \lfloor \frac{\pi}{2\theta} \rfloor$) の線で囲まれた領域を z_h とする (v_i は z_0 内に位置する)． $k - 1$ 個の端末を選択するまで、 $h = 1, -1, 2, -2, \dots$ の順番で無線範囲を分割した領域 z_h から、宛先領域 $dset_i$ の中心地に一番近い端末を選択する (図 4 は、 $k = 3$ に対する例である)．

θ はプロトコルの定数であり、シミュレーションでは、

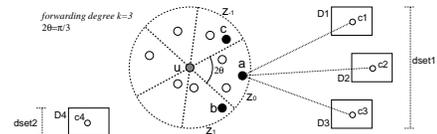


図 4 宛先領域グループ $dset_1$ に対する転送先隣接端末の選択

$2\theta = \pi/3$ としている．

4.3.2 ルーティングテーブルの更新

端末 u が ND-group 集合 $\{ND_1..ND_p\}$ を付加した経路探索メッセージを送信する際、各 $ND_i = \{nset_i : dset_i\}$ に対して新しいエントリ $\langle s, D_{j'}, u', n_j, hc, False, LT \rangle$ をルーティングテーブルに生成する．ここで、 $n_j \in nset_i$ 、 $D_{j'} \in dset_i$ であり、 u' は、経路探索メッセージを端末 u に転送した隣接端末を表し、 hc は、受信した経路探索メッセージの hop フィールドに記されているホップ数を表す． LT は、プロトコルの定数で、このエントリの生存時間の初期値を表すものとする．

なお端末 u が、同じ宛先領域を付加した経路探索メッセージをすでに受信している場合は、上記と同様にルーティングテーブルを更新するが、経路探索メッセージは転送しない．例えば、図 5(a) は、端末 c が端末 a, b から経路探索メッセージを受信した後の端末 c が保持しているルーティングテーブルの状態を示している．端末 a からのメッセージが、端末 b からのメッセージよりも早く到達したとすると、端末 c は、ルーティングテーブルに両方のメッセージに対するエントリを追加するが、端末 a からのメッセージのみに対しメッセージ転送を行う．

4.4 経路確定

宛先領域 D_i 内に位置する端末 v が、 D_i 外に位置する端末 u から経路探索メッセージを受信すると、 v は D_i 内に位置する隣接端末と D_i から構成する ND-group を作成し、それを含むメッセージをブロードキャストした上で、ルーティングテーブルを更新する．また、端末 u に返信メッセージを送信する．端末 u に返信メッセージを送信する．次に from フィールドが端末 u の ID であるエントリの flag フィールドに True をセットする．同様に、 D_i 外に位置する端末 v' が返信メッセージを受信すると、隣接端末 u' にメッセージを転送し、対応するエントリの flag フィールドに True をセットする．

図 5(b) に例を示す．端末 c が端末 e から返信メッセージを受信すると、端末 a を選択し、 a に返信メッセージを転送する．また、それに対応するエントリの flag フィールドに True をセットする．次に端末 c が端末 d から返信メッセージを受信すると、それに対応するエントリに True をセットするが、すでに返信メッセージを転送しているため、それ以上転送しない．

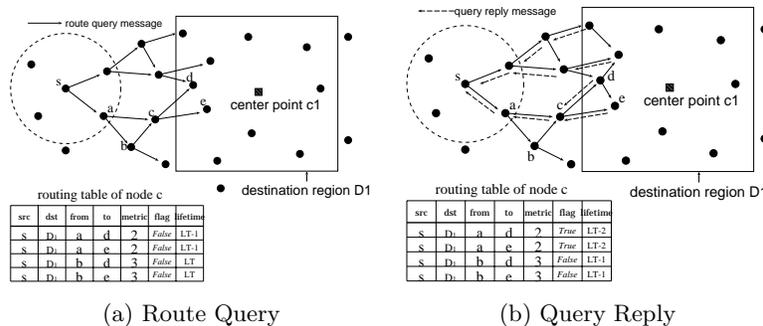


図 5 メッセージ転送とルーティングテーブル更新の例

データ送信元端末 s は、経路探索メッセージを送信してから適当な時間返信メッセージを待つ。全宛先領域から返信メッセージが返ってきた場合は、 s は全宛先領域を含んだ経路木が構築されたことがわかり、データパケットの送信を開始することができる。宛先領域の一部から返信メッセージが送られてこない場合、それらの宛先領域群に対し k の値と seq の値を増やして経路探索メッセージを再送信する。

4.5 端末の移動性の考慮

各端末は、*hello* メッセージにより隣接端末の位置情報を把握する。隣接端末が自身の無線範囲外に移動すると、ルーティングテーブルから、それに関連したエントリを消去する。MgCast において、*flag* フィールドが *False* であるエントリは、生存期間が過ぎるまではバックアップエントリとして使用できる。端末 v のエントリ $(s, D_i, u, w, hc, False, lt)$ が、 w または v が移動したため無効になった場合、 v は *flag* フィールドが *False* でありかつ宛先領域 D_i が記されている他のエントリを調べ、端末 s の代わりに代替経路を見つけるため、そのエントリを用いて経路探索メッセージを送信する。なお、 v に返信メッセージが返ってこない場合は、端末 v は端末 s に向けて経路切断検出メッセージを送信する。それを受信した s は、宛先領域 D_i に対して経路探索を実行する。

5. 評価実験

提案したプロトコルの有効性を検証するため、Glomosim シミュレータ上に提案したプロトコルを実装し、評価実験を行った。

5.1 シミュレーション設定

本実験において、アドホックネットワーク空間を $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 、宛先領域を $(100\text{m} \sim 200\text{m}) \times (100\text{m} \sim 200\text{m})$ の長方形、全移動端末 n を $150 \sim 300$ とし、各端末の初期位置をランダムに決定した。各端末は同じ無線範囲であるものとし、実験における無線範囲 d は、 $100\text{m} \sim 200\text{m}$

とした。

移動モデルは、Glomosim に提供されている random walk model を採用した。実験における pause time は、 $0\text{s} \sim 60\text{s}$ とした。各端末の移動速度は、 $1.5\text{m/s} \sim 10\text{m/s}$ とし、歩行者から自転車を選定している。各シミュレーション時間は、 500s とし、ランダムに選択されたデータ送信元端末が、毎秒 512 バイト長の CBR を送信する。各リンクの帯域幅を 2Mbps とする。なお、本シミュレーションにおいては、パケットロスやパケット衝突は考慮に入っていない。

評価項目として、以下の 4 つを用いた。

- 経路発見率 (宛先領域までの経路発見率)
- 経路探索メッセージ数 (1 回の経路探索において、転送された経路探索メッセージの総数)
- メッセージオーバーヘッド (データパケット毎の制御メッセージの総数)
- 経路コスト (経路木のリンクの総数)

提案プロトコルとの比較対象として、文献 6) で提案されている Location-Based Multicast(LBM) を用いた。LBM では、各送信端末は、自身と宛先領域を包み込む最小の長方形内に位置する端末にのみパケットを転送する。また、複数の宛先領域に対する既存の手法が無いため、各宛先領域に対して、個別に経路探索を実行するように MgCast を修正したものを “MgCast/ind” して用いた。

5.2 経路発見に関する性能評価

5.2.1 経路発見率

端末数 n や無線範囲 d 、宛先領域数 $|D|$ が 1 と 3 のもとでそれぞれ経路発見率を測定した。 $|D| = 1$ においては、転送先隣接端末数 k に 1, 2, 3 を、 $|D| = 3$ においては、1, 2 を用いた。測定した結果を図 6 に示す。

$|D| = 1$ において (図 6(a))、MgCast では、 k の値が大きい程、 k が小さい場合や LBM よりも経路発見率が高いことがわかった。しかし経路発見率とメッセージには、トレードオフが存在するため、5.2.2 節で経路探索メッセー

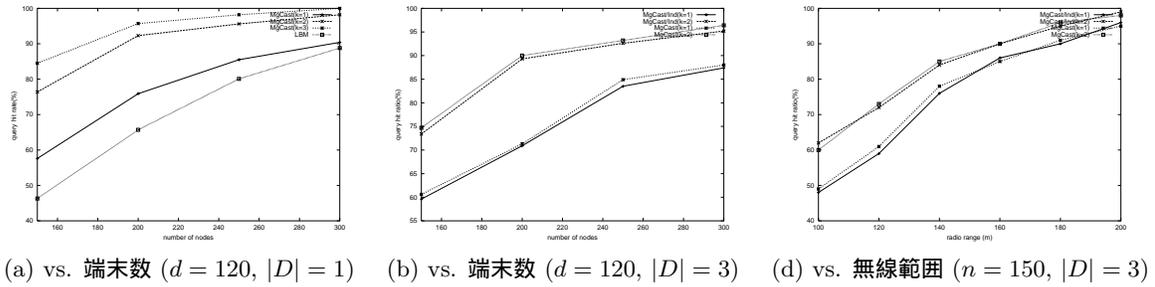


図 6 経路発見率

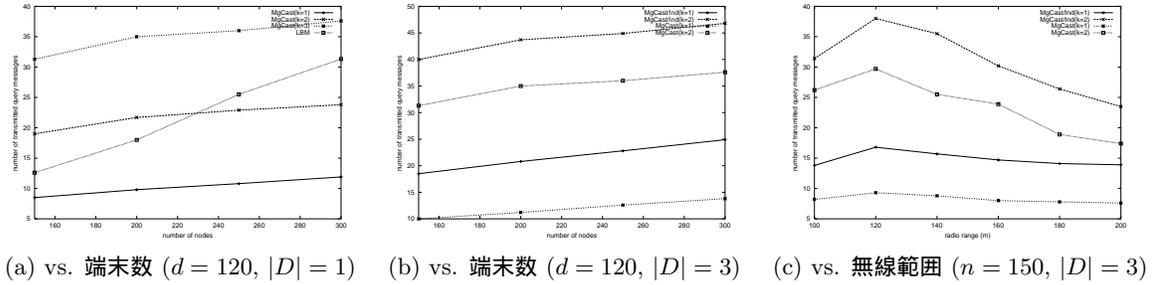


図 7 経路探索メッセージ数

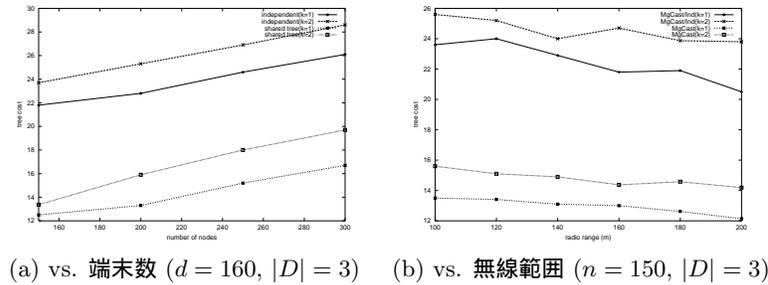


図 8 経路木のコスト

ジ数を評価し、両方の評価項目の観点からみて、MgCast が適切なバランスを達成していることを確かめる。

$|D| = 3$ において (図 6(b), 図 6(c)), MgCast は MgCast/ind よりも少し経路発見率が高いことがわかった。MgCast/ind では、各宛先領域に対して個別に経路を探索するため、データ送信元端末から宛先領域までの経路が迂回経路しかないような宛先領域が 1 つでも含まれていると、その迂回経路を発見できない場合がある。そのため MgCast よりも発見率が低くなると考えられる。

5.2.2 経路探索メッセージ数

経路発見率を測定したものと同一シミュレーションにおいて、経路探索メッセージ数を測定した。測定した結果を図 7 に示す。

$|D| = 1$ において (図 7(a)), MgCast では、経路探索パケット数は、端末数や無線範囲の値に比例して増加することがわかった。しかし、LBM と比べ、増加率はかな

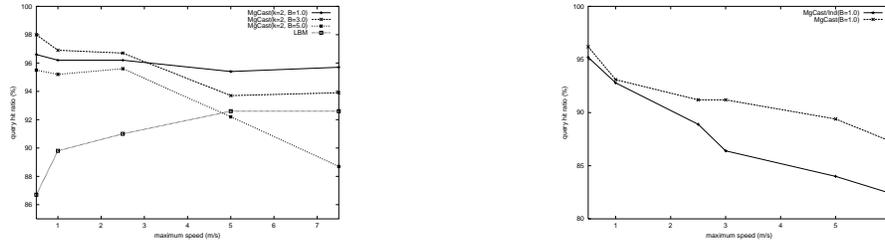
り抑えられていることがわかった。この結果と、先程の実験結果から、MgCast は、経路発見率と経路探索メッセージ数の良好なバランスを達成している。

$|D| = 3$ において (図 7(b), 図 7(c)), MgCast は、同じ k の値を用いた MgCast/ind より経路探索メッセージ数が少なかった。これは想定された結果であるが、前述の経路発見率も考慮すると、MgCast は MgCast/ind より効率が良いといえる。

5.2.3 経路コスト

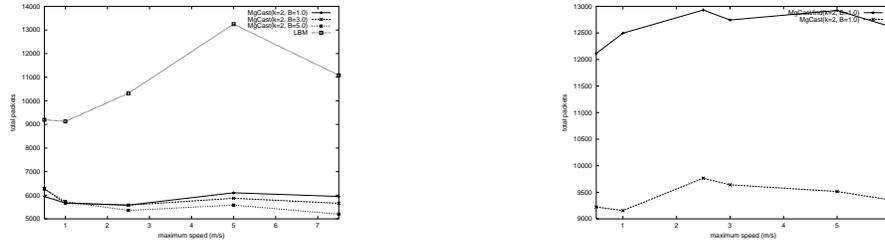
MgCast と MgCast/ind を用いて、経路コストを測定した。測定した結果を図 8 に示す。

端末数の違いによる比較を行った結果 (図 8(a)), いずれも経路コストは比例して増加した。また、無線範囲の違いによる比較を行った結果 (図 8(b)), どちらも無線範囲の値に比例して経路コストは減少した。これは、データ送信元と宛先領域までのホップ数が少なくなるためであ



(a) vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, |D| = 1$) (b) vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, |D| = 3$)

図 9 移動性を考慮した経路発見率



(a) vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, |D| = 1$) (b) vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, |D| = 3$)

図 10 メッセージオーバーヘッド

ると考えられる．また，いずれの比較の場合も，MgCast は MgCast/ind より経路コストは低いことがわかった．

5.3 移動性を考慮した性能評価

5.3.1 経路発見率

端末の最大移動速度を変化させるシミュレーションシナリオを通じた経路発見率を測定した．このシミュレーションにおいて，各経路要求は端末の移動による経路の切断のため実行されるという点で，前節で測定した経路発見率とは異なる．また，*hello* メッセージを交換する秒間隔 B の値をいくつか用いた．測定した結果を図 9 に示す．

図 9(a) から， B が小さいほど経路発見率が高いことがわかった．これは， B の値が小さいほど，隣接端末の位置情報の精度が高いからである．また，最大移動速度に比例して経路発見率は減少することがわかった．これは，端末が頻繁に移動すれば，高い経路発見率を維持するために，隣接端末と頻繁に位置情報を交換する必要があるためである． $|D| = 3$ において (図 9(b))，MgCast と MgCast/ind は，ほとんど変わらないことがわかった．

5.3.2 メッセージオーバーヘッド

先程にも述べた通り，経路発見率と経路探索メッセージ数にはトレードオフが存在する．ここで，MgCast が端末の移動性を考慮したもとの，トレードオフが存在する 2 つの評価項目からみて良いバランスを達成していることを確かめるため，5.1 章で定義したメッセージオーバーヘッドを測定する．測定した結果を図 10 に示す．

測定した結果から， $|D| = 1$ (図 10(a)) において，Mg-

Cast は，LBM と比較したメッセージオーバーヘッドは非常に少ないことがわかった．これは，LBM では，パケット送信端末と宛先領域を包み込む最小の長方形内に位置する全端末にメッセージを転送するためである．一方 MgCast では，隣接端末情報を用いて，定数個の隣接端末にのみメッセージを転送するため，経路発見率とメッセージ数は安定している． $|D| = 3$ (図 10(b)) において，MgCast は，MgCast/ind よりも非常に良い値を達成していた．

6. 地理情報を用いた性能評価

MgCast の実環境での有用性を示すために，本稿では，実際の地図情報を用いてシミュレーション実験を行った．

シミュレーションにおいて主流な Random Walk Model (RWM) では，実際に移動する人などの動きを正確に表現できていない．例えば，大学の構内や自然公園を移動する歩行者で MANET を構築する場合，建物や森，池など，無線通信が遮られたり歩行者が存在しない領域 (障害物) が存在するため，シミュレーション環境においても障害物を生成し，適切な端末の移動モデルを用いる必要がある．

文献 9) では，建物などの障害物を考慮した，より現実的な移動モデルである Obstacle Model を提案しており，障害物を生成しそれらを考慮した移動モデルを表現できる Glomosim へのプラグインを実装している．そこで，このプラグインを用いて大阪大学豊中キャンパスの校舎配置に基づいて生成した領域空間モデル (図 11) をシミュレーション空間とし，移動モデルに Obstacle Model を用い

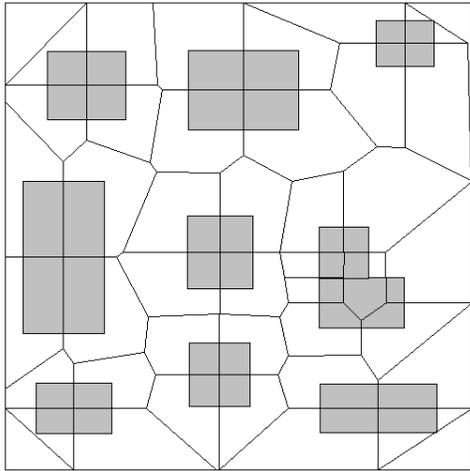
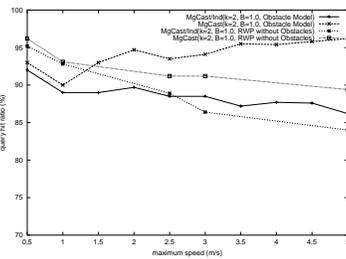


図 11 大阪大学キャンパスをモデル化したシミュレーション空間モデル



vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, D = 3$)

図 12 障害物を考慮した経路発見率

て MgCast の性能評価を行った。測定した結果を図 12 に示す。

測定した結果から、移動モデルの違いにより、結果も異なることがわかった。全体的に、Obstacle Model を用いた方が、RWM よりも良い値を達成していた。なお、メッセージオーバーヘッドに関する実験結果は本稿ではスペースの都合上割愛しているが、Obstacle Model と RWM との差はほとんどなかった。

7. おわりに

本稿では、モバイルアドホックネットワークにおける、複数の地理的な領域に対する位置情報を利用したマルチキャストプロトコルを提案した。提案した手法では、各端末は自身の隣接端末群の位置情報を把握しているものとし、宛先領域に近い定数個の隣接端末にのみ、経路探索メッセージを転送することで、安定した経路発見率を保ちながら、不要なメッセージを制御することができる。さらに、互いに近い複数の宛先領域が存在した場合、構築される経路木のコストを抑えるため、それらの宛先領

域を含んだ共有木を構築する。

今後の課題として、実際の位置情報アプリケーションを考慮したシミュレーション実験を行うことなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 沖野智幸, 峰野博史, 石原進, 水野忠則, "アドホックネットワークにおける位置依存情報配布のための中継ホスト選択手法," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2003) シンポジウム論文集, pp. 609-612 (2003).
- 2) M. Mauve, J. Widmer and H. Hartenstein, "A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Network Magazine*, Vol. 15, No. 6, pp. 30-39 (2001).
- 3) Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. of 4th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'98), pp.66-75 (1998).
- 4) B. Karp and H. T. Kung, "GPSR:Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," Proc. of 6th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000), pp.243-254 (2000).
- 5) K. Chen and K. Nahrstedt, "Effective Location-Guided Tree Construction Algorithms for Small Multicast in MANET," Proc. of IEEE INFOCOM 2002 (2002).
- 6) Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, "Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks; Location-Based Multicast Algorithms," Proc. of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA'99), pp.101-110 (1999).
- 7) 橋本英卓, 中西恒夫, 福田晃, "セル位置情報に基づくアドホックネットワークルーティング," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2001) シンポジウム論文集, pp. 127-132 (2001).
- 8) Chih-Yung Chang and Shin-Chih Tu, "Obstacle-Free Geocasting Protocols for Single/ Multi-Destination Short Message Services in Ad Hoc Networks," Proc. of Wireless Networks, Vol. 9, No. 2, pp. 143-155 (2003).
- 9) A. Jardosh, E. M. Royer, K. C. Almeroth, and S. Suri, "Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks," Proc. of 9th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2003), pp.217-229 (2003).