

推薦論文

MANET における位置情報マルチキャストルーティング
MgCast の提案と性能評価

水本 明[†] 山口 弘 純[†]
廣森 聡 仁[†] 谷口 健 一[†]

本論文では、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し、地理的な宛先領域群への経路木を構築するプロトコル *MgCast* を提案する。*MgCast* の各移動端末は、隣接する移動端末群の位置情報を把握し、定数個の隣接端末のみをメッセージ転送端末として指定した経路探索メッセージをブロードキャスト送信する。宛先領域への距離と方向から適切な隣接端末を選択することで、経路探索メッセージ数を抑えながら高い経路発見率を達成する。また、複数の宛先領域に対し、なるべく総リンク数が少ない共有型の経路木を構築することで、データパケット数を少なくする。経路木構築は分散的に行われるため、ある特定の端末が構築木を計算する必要はない。移動端末密度が比較的高い環境を想定したシミュレーション実験により、代表的な位置情報マルチキャストルーティングプロトコル LBM と比較し、*MgCast* はほぼ同数の経路探索メッセージ数で約 16% 高い経路発見率を達成した。また 3 つの宛先領域に対し宛先領域ごと独立に *MgCast* で経路木を構築した場合と比較し、*MgCast* での総リンク数は約 67% に抑えられた。以上より、*MgCast* は経路発見率、経路探索メッセージ数、経路木のリンク数において適切なバランスを達成していることが分かった。

A Cost-conscious Geographic Multicast Protocol on MANET

AKIRA MIZUMOTO,[†] HIROZUMI YAMAGUCHI,[†] AKIHITO HIROMORI[†]
and KENICHI TANIGUCHI[†]

In this paper, we propose a location-aware and cost-conscious multicast protocol on MANET called *MgCast*. Assuming that each node knows its neighboring nodes' locations, it specifies some appropriate neighbors as the forwarders of route query messages. This can avoid redundant route query messages while keeping reasonable route discovery ratios. Also, *MgCast* constructs a shared tree for multiple destination regions to reduce redundant duplication of data packets. Since the construction is done in a decentralized manner, no explicit tree computation at a certain node is required. The experimental results have shown that *MgCast* could achieve about 16% higher route discovery ratio in average compared with LBM using almost the same number of route query messages. In addition, for three destination regions, the average number of links of the routing tree in *MgCast* was about 67% of that in the different version of *MgCast* where a tree was built for each destination region.

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おり、MANET に関する研究が多数行われている¹⁾。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 (以下、

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、各端末がルータのように振る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繁に移動や参加・離脱などを行うと考えられるた

[†] 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 Technol-
ogy, Osaka University

本論文の内容は 2003 年 6 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウムにて報告され、DICOMO2003 プログラム委員会委員長により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

め、ネットワークポロジも頻繁に変更される。したが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すべ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。

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²⁾⁻⁹⁾。たとえば、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、どの端末が経路探索メッセージを転送すべきかが決定される。

本論文では、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。*MgCast* は経路探索メッセージを用いて、宛先として指定された複数の地理的領域への経路木をオンデマンドで構築する。*MgCast* の各端末は、自身および隣接する端末群の位置情報を把握し、定数個の隣接端末のみをメッセージ転送端末として指定した経路探索メッセージをブロードキャスト送信する。宛先領域への距離と方向から適切な隣接端末を選択することで、経路探索メッセージ数を抑えながら高い経路発見率を達成する。また、複数の宛先領域に対し、なるべく総リンク数が少ない共有型の経路木を構築されるよう各端末が隣接端末の選択を行うことで、データパケット数をなるべく少なくする。なお、この構築は分散的に行われるため、ある特定の端末が構築木を計算する必要はない。

端末密度が比較的高い環境を想定したシミュレーション実験により、代表的な位置情報マルチキャストルーティングプロトコル *LBM* と比較し、*MgCast* はほぼ同数の経路探索メッセージ数で約 16% 高い経路発見率を達成した。また 3 つの宛先領域に対し宛先領域ごと独立に *MgCast* で経路木を構築した場合と比較し、*MgCast* での総リンク数は約 67% に抑えられた。以上より、*MgCast* は経路発見率、経路探索メッセージ数、経路木のリンク数において適切なバランスを達成していることが分かった。

2. 関連研究

MANET における、位置情報を利用したユニキャスト経路発見手法³⁾⁻⁵⁾ やマルチキャスト経路発見手法⁶⁾⁻⁹⁾ が提案されてきている²⁾。

文献 6) では、全端末の位置情報を用いて MANET

での効率良いマルチキャスト配送木を構築する手法が提案されている。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 8), 9) では、領域を分割し、分割された各小領域 (セル) に空間内のすべ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 7) 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) で提案されているユニキャストルーティングプロトコル 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呼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経路探索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、端末密度によってはきわめて多数の経路探索メッセージを必要とし、また迂回経路が発見しにくい場合がある。

我々は、学園祭など中規模の野外イベントの参加者に GPS を装備したナビゲート用 PDA を貸し出し、それらの間で MANET を構築して、イベント開催情報を配信するようなアプリケーションを対象とする。そのようなアプリケーションでは、参加者の位置分布が一様でないもとの、人が密集するいくつかのホットスポット (複数の宛先領域) に向けて効率良くイベント案内などのデータを配信したいといった要求がある。

提案する *MgCast* では、端末密度にかかわらず、各端末はつねに宛先領域への距離と方向から決定される定数個の隣接端末を転送端末とすることで、経路発見率を高くしながら経路発見メッセージ数を抑える工夫をする。また、複数の宛先領域に対しリンク数の少ない経路木を構築できる。これらの経路木構築操作を完全な分散型で実現することでスケラビリティを確保している。

3. *MgCast* の前提条件と概要

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。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)

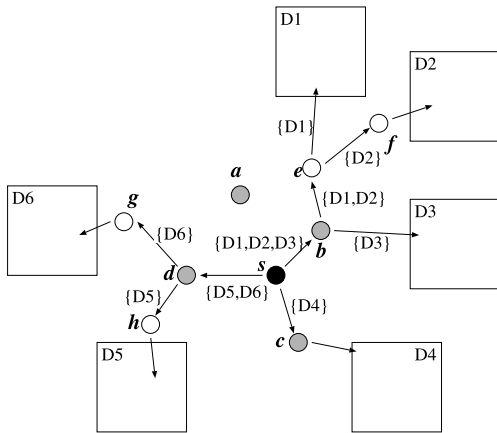


図 1 MgCast における経路探索例
Fig. 1 Route query in MgCast.

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* メッセージ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する。

隣接する端末間の通信は、ブロードキャスト型を仮定する。すなわち、1 回のメッセージ送信によりすべての隣接端末にメッセージが配送される。

3.2 MgCast の概要

本節では、MgCast の経路探索手順の概要を述べる。送信端末は、複数の宛先領域に対し、同方向に位置する宛先領域群をグループ化し、各グループに対し、そのグループに関する経路探索メッセージ (route query メッセージ) の転送を行う隣接端末を定数個指定する。そのうちの 1 つとして、グループ内の宛先領域群の中心地点の重心に最も近い隣接端末を指定することで、経路探索メッセージがなるべくその宛先領域グループに近づくようにする。たとえば図 1 で、送信端末 *s* の隣接端末が *a*, *b*, *c*, *d* であるとする。この図では、宛先領域群 $\{D_1, \dots, D_6\}$ が $\{D_1, D_2, D_3\}$, $\{D_4\}$, $\{D_5, D_6\}$ の 3 グループに分割され、それぞれ隣接端末 *b*, *c*, *d* が転送端末として指定された状況を示している (この例では各グループに対し指定された隣接端末は 1 つである)。以下、宛先領域グループとそれに対し指定された隣接端末グループの組を ND-group と呼び、 $\{n_1..n_k : D_1..D_m\}$ の型式で表す (n_i は送信端末の隣接端末, D_j はある宛先領域を表す)。送信端末は作成した ND-group の集合 (ND-group 集合) を 1 つの経路探索メッセージに付加し、ブロードキャスト送信する。例では、送信端末 *s* は ND-group 集合 $\{ \{b : D_1, D_2, D_3\}, \{c : D_4\}, \{d : D_5, D_6\} \}$ を付加した経路探索メッセージをブロードキャスト送信

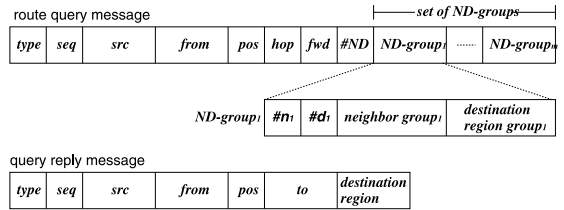


図 2 メッセージフォーマット
Fig. 2 Message format.

する。

経路探索メッセージを受信した端末は、自身がそのメッセージのある ND-group 中に含まれていれば、その ND-group の宛先領域グループをさらにグループ化して ND-group 集合を作成し、それを付加した経路探索メッセージをブロードキャスト送信する。そうでなければ単に受信メッセージを破棄する。この手続きが繰り返されることで、やがて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する。例で、端末 *d* が送信端末 *s* から経路探索メッセージを受信したとする。端末 *d* は、自身がそのメッセージ中の ND-group $\{d : D_5, D_6\}$ に指定されているため、その ND-group の宛先領域グループ $\{D_5, D_6\}$ から新たに ND-group 集合 $\{ \{h : D_5\}, \{g : D_6\} \}$ を作成し、これを付加した経路探索メッセージをブロードキャスト送信する。

ある宛先領域内に位置する端末は、宛先領域外に位置する端末から経路探索メッセージを受信した場合に返信メッセージ (query reply メッセージ) を送り返す。返信メッセージは、経路探索メッセージにより一時的に構成された経路を逆向きにたどって送信端末に配送され、これにより経路木が構築される。なお、宛先領域内に位置する他の端末群へのデータ配信は、同じ宛先領域内に位置する隣接端末のみを対象とした限定的なフラッディングにより行う。

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 (route query メッセージ) と返信メッセージ (query reply 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* フィールドはメッセージの型 (経路探索または返信) を表し、*seq* フィールドは端末が同じ経路探索に関するメッセージを複数回受信した場合に、それらを不必要に転送することを防止するシーケンス番号を格納する。*src* フィールドは経路探索を開始した端末 (送信端末) の ID を格納し、*from*

フィールドはこのメッセージを送信してきた隣接端末の ID を格納する．*pos* フィールドは *from* フィールド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，*hop* フィールドは送信端末からのホップ数を表し，*fwd* フィールドは後述する転送次数を表す．*#ND* は ND-group 集合の要素数を表す．各 ND-group は宛先領域グループと，それに関する経路探索メッセージを転送する隣接端末群からなり，各 *ND-group* フィールドには宛先領域グループの領域数 $\#d_i$ ，隣接端末数 $\#n_i$ を含む．返信メッセージにおいて，*to* フィールドはこのメッセージの受信端末の ID を表し，*destination region* フィールドは，この返信メッセージがどの宛先領域からのものかを表す．なお各宛先領域は多角形であり，頂点座標の並びにより指定される．

4.2 ルーティングテーブル

MgCast の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 次組である．*src* は送信端末の 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* はデータパケットを転送する隣接端末の ID，*metric* は送信端末から自身までの経路のメトリック（たとえばホップ数），*flag* はエントリが有効であるか否かを示す論理値を表す．*lifetime* はエントリの残り生存時間を表し，エントリが参照された場合に一定値が加算される．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，*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* は送信端末， D_i は宛先領域（多角形）を表すものとする．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 経路探索メッセージの転送方法

送信端末 *s* は，宛先領域群 D_1, \dots, D_n をグループ集合 $\{dset_1, \dots, dset_m\}$ ($m \leq n$) にグループ化する．ただし，各 D_i はいずれか 1 つのグループ $dset_j$ に必ず属するものとする．また，端末 *s* を中心に，北方向への線分と線分 \overline{sc} により時計回り方向に形成される角度を $\angle sc$ とするとき，すべての i, j, x, y について $i < j$ かつ $D_x \in dset_i$ かつ $D_y \in dset_j$ ならば $\angle sc_x \leq \angle sc_y$ が成り立つとする．これは，*s* を中心とした線分により宛先領域群をグループ化することを表す．たとえば図 3 (a) では 3 本の線分により宛先領域群が 3 つにグループ化されており，図 3 (b) では 4 本の線分により 4 つにグループ化されている例を表

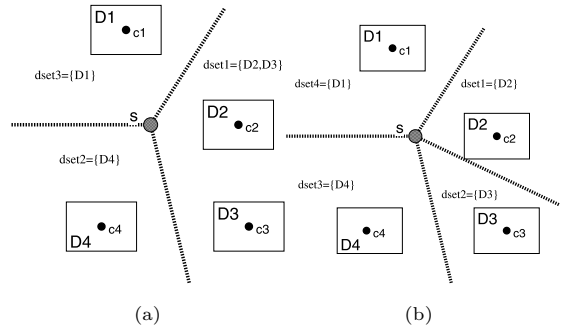


図 3 宛先領域のグループ化の例
Fig. 3 Division of destination region group.

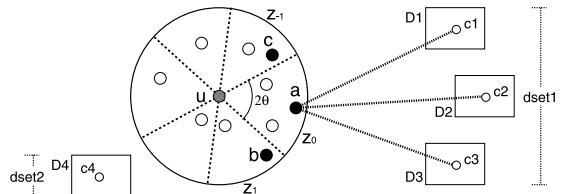


図 4 宛先領域グループ $dset_1$ に対する隣接端末の選択
Fig. 4 Selection of neighbors for $dset_1$.

している．

次に端末 *s* は，ND-group $\{nset_i : dset_i\}$ を作成するために， $dset_i$ に k 個の隣接端末 $nset_i$ を割り当てる．ここで， k は転送次数と呼ばれる定数である．端末 *s* の各隣接端末は，受信した経路探索メッセージに含まれる ND-group $\{nset_i : dset_i\}$ 中に自身が指定されていれば， $dset_i$ を同じ手続きでグループ化して ND-group 集合を生成し，そうでなければメッセージを棄却する．

これを一般化して述べる．ある端末 *u* が，経路探索メッセージを受信し，そのメッセージのある ND-group $\{nset : dset\}$ 中に自身の ID が記されているとする．端末 *u* は， $dset$ の各グループ化方法 $\{dset_1, \dots, dset_m\}$ に対し，以下の値を計算し，これをこのグループ化のコストとする．

$$\sum_{0 \leq i \leq m} \{ \min_{v_i} \sum_{D_j \in dset_i} d_{v_i, c_j} \}$$

ここで， d_{v_i, c_j} は v_i と c_j のユークリッド距離を表す． v_i ($i = 1..m$) はグループ $dset_i$ に対し， $dset_i$ の宛先領域群の中心へのユークリッド総距離が最小である隣接端末を表し，上式はそのユークリッド総距離の全グループの総和を表す．図 4 に例を示す．この例は，端末 *u* に対し， $dset_1 = \{D_1..D_3\}$ の中心地 $\{c_1, c_2, c_3\}$ への総距離が最小である隣接端末は端末 *a* であることを表している．

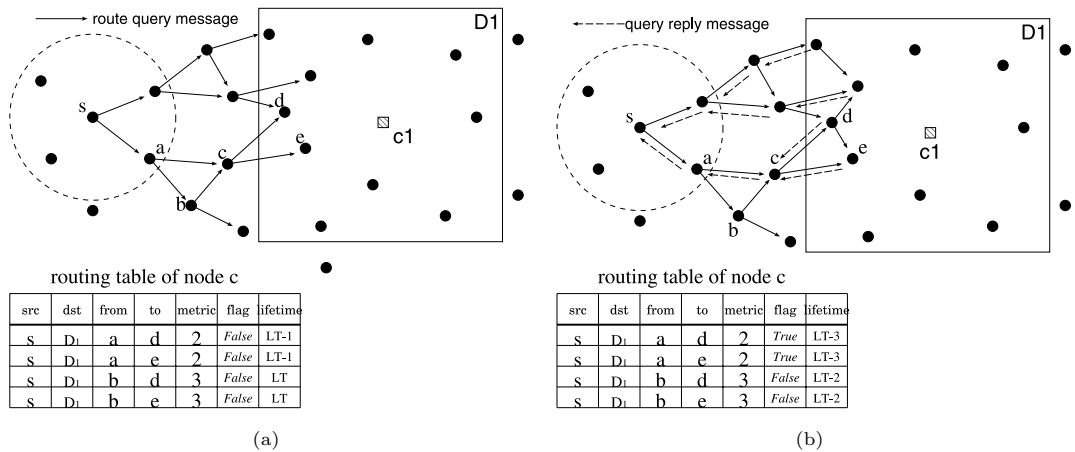


図5 メッセージ転送とルーティングテーブル更新の例
Fig. 5 Message propagation and table update.

なお n 個の宛先領域を前述の方法でグループ化する方法は $\sum_{0 \leq i \leq n} n C_i$ 通りがあるが、そのそれぞれについて上述のコストを計算し、コストが最小であるグループ化方法と対応する隣接端末群から ND-group 集合を生成する。

MgCast では、各宛先領域グループに対し、転送回数 (以下 k とする) 個の隣接端末を指定する。端末 u は $dset$ のコスト最小グループ化方法 $\{dset_1 \dots dset_m\}$ と対応した隣接端末群から ND-group 集合を生成するが、さらに各 ND-group に対し $k-1$ 個の隣接端末を以下の方法で追加する。端末 u は、ND-group $\{v_i : dset_i\}$ に対し、 v_i の方向を 0 度と見なし、角度 2θ ごとに無線範囲を分割する (図 4)。角度 $(2h-1)\theta$ と $(2h+1)\theta$ ($h = -\lfloor \frac{\pi}{2\theta} \rfloor \dots \lfloor \frac{\pi}{2\theta} \rfloor$) 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)。端末 u は $h = 1, -1, 2, -2, \dots$ の順で領域 z_h から宛先領域 $dset_i$ の中心地が一番近い隣接端末を選択し、ND-group に追加する。これには、互いにある程度離れた隣接端末を転送端末として選択することで、異なる方向へのメッセージを生成し、迂回路を発見しやすくする目的がある。たとえば図 4 では、転送回数 $k=3$ の場合、 $dset_1$ の転送端末として a に加え b および c を選択する。なお、 θ は定数であり、シミュレーション実験では $\theta = \pi/6$ とした。

4.3.2 ルーティングテーブルの更新

端末 v が隣接端末 u から経路探索メッセージを受信し、ND-group 集合 $\{ND_1 \dots ND_m\}$ を付加した経路探索メッセージを送信する際、各 ND-group $ND_i = \{nset_i : dset_i\}$ の $w \in nset_i$ と $D_j \in dset_i$ の組ごとに、新しいエントリ $\langle s, D_j, u, w, hc, False, LT \rangle$ をルーティングテーブルに生成する。ここで、 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し、 LT はエントリの生存時間の初期値を表す定数である。なお、端末 v が同じ宛先領域群に対する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。

図 5 (a) に例を示す。この図は端末 c が端末 a および b から経路探索メッセージをこの順で受信した後の、端末 c のルーティングテーブルの状態を示している。端末 c は、両方のメッセージに対するエントリをルーティングテーブルに追加するが、端末 b からのメッセージは転送しない。

4.4 返信メッセージによる経路決定

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した場合、前節の方法でルーティングテーブルを更新する。次に、 $\langle s, D_i, -, -, -, True, - \rangle$ であるエントリ ($-$ は任意の値を表す) がルーティングテーブルに存在しない場合に限り、端末 u に返信メッセージを送信し、 $\langle s, D_i, u, -, -, -, - \rangle$ の $flag$ フィールドを $True$ とする。

同様に、 D_i 外に位置する端末 v が端末 w から返信メッセージを受信した場合、 $\langle s, D_i, -, -, -, True, - \rangle$ であるエントリが存在しない場合に限り、メトリックが最小である $\langle s, D_i, -, -, -, False, - \rangle$ エントリの $from$ フィールドに指定された隣接端末に返信メッセージを転送し、このエントリの $flag$ フィールドを $True$ とする。 $\langle s, D_i, -, -, -, True, - \rangle$ なるエントリがすでに存在する場合、 $\langle s, D_i, u, w, -, False, - \rangle$ の $flag$ フィールドを $True$ とし、返信メッセージは転送しない。

図 5 (b) に例を示す。この図は、端末 c が端末 e から返信メッセージを受信し、メトリックが最小である

エン트리 $\langle s, D_1, a, e, 2, False, - \rangle$ を選んで端末 a にメッセージを転送して $flag$ フィールドを $True$ とした後、端末 d から返信メッセージを受信し、 $\langle s, D_1, a, d, 2, False, - \rangle$ の $flag$ フィールドを $True$ としたときの状態を示している。

送信端末 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された場合、 s は全宛先領域を含む経路木が構築されたことが分かり、データパケットの送信を開始する。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転送回数 k の値とシーケンス番号 seq の値に 1 を加算した経路探索メッセージを再送信する。

4.5 データパケットの配信

送信端末 s が送信したデータパケットは、 $flag$ フィールドが $True$ であるルーティングテーブルエントリを用いて宛先領域へ転送される。また、宛先領域 D_i 内に位置する端末がデータパケットを受信した場合、同じ D_i 内に位置する隣接端末群を転送端末に指定してデータパケットをブロードキャスト送信する。これにより D_i 内の端末群のみにデータパケットが配信される（宛先領域内の限定的なフラッディング）。ただし、この方法では宛先領域内のいずれかの端末に経路探索メッセージが到達した場合でもメッセージを受信できない宛先領域内の端末が存在しうる。

4.6 経路の再探索

各端末は $hello$ メッセージにより隣接端末の存在および位置情報を把握する。隣接端末を検知できなくなった場合はルーティングテーブルからその隣接端末に関連したエントリを削除する。

MgCast では、 $flag$ 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する。端末 v のエントリ $\langle s, D_i, -, w, -, True, - \rangle$ が、 w の移動により削除された場合、 v は他のエントリ $\langle s, D_i, -, w', -, False, - \rangle$ があれば w' に経路探索メッセージを送信し、なければ新たに隣接端末を選択し、宛先領域を D_i とした経路探索メッセージを送信して代替経路の発見を試みる。なお、端末 v に返信メッセージが返されない場合、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し、送信端末 s に経路の再探索を促す。

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、Glo-mosim シミュレータ上に MgCast を実装し、評価実験を行った。

5.1 シミュレーション設定

2章で述べたように、我々は学園祭など中規模（数百人規模）の野外イベントの参加者が GPS を装備したナビゲート用 PDA を保持し、それらの間で MANET を構築して、イベント開催情報を数カ所のホットスポット（たとえばイベント会場の入り口付近など）に配信するようなアプリケーションを対象としている。これに基づき、本実験ではアドホックネットワーク空間を $1,000\text{ m} \times 1,000\text{ m}$ 、宛先領域を $(100 \sim 200\text{ m}) \times (100 \sim 200\text{ m})$ の長方形、宛先領域数を 1 または 3、全移動端末数を $150 \sim 300$ 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を持つものとし、無線範囲は $100\text{ m} \sim 200\text{ m}$ とした。移動モデルは、Glo-mosim に提供されている random waypoint model を採用し、pause time を $0 \sim 60\text{ s}$ とした。端末の保持者は歩行者から自転車程度の速度で移動すると想定し、端末の移動速度は $0.5 \sim 7.0\text{ m/s}$ とした。1回のシミュレーションの実行時間は 500 s とし、あらかじめランダムに選択された送信端末が、 512 バイト長のパケットを毎秒 1 パケット送出するようにした。各リンクの帯域幅は 2 Mbps とした。

5.2 節においては、まず経路探索に関する性能を評価するため、経路発見率（経路探索手続きの全試行回数中、全宛先領域を含む経路木を発見できた回数の割合）および経路探索メッセージ数（1回の経路探索手続きにおいて送信された経路探索メッセージの総数）を測定した。これらは一般にトレードオフの関係にあるため、そのバランスが重要となる。次に、5.3 節では、データ送信効率の良い経路木を発見できているかを評価するため、経路木の総リンク数（これを経路コストと呼ぶ）を測定した。さらに、5.4 節では、端末が移動するもとの効率良く経路を構築、維持できているかを調べるため、シミュレーション実行時間内に実行された経路探索および経路再探索手続きの総試行回数のうち経路を発見できた試行回数の割合（これを経路維持率と呼ぶ）を測定した。さらに交換されるメッセージ数の妥当性を評価するため、 $hello$ メッセージ数なども考慮にいれた総メッセージ数（シミュレーション実行時間内に交換された総メッセージ数）を測定した。最後に 5.5 節では、より現実的な環境で提案プロトコルの評価を行うため、建物などの障害物がある地理領域での経路維持率および総メッセージ数を評価した。

5.2 節および 5.4 節では、代表的な位置情報マルチキャストプロトコルである LBM⁷⁾ を比較対象として用いた。ただし、LBM を含めた既存のプロトコルは

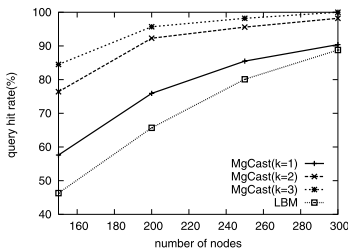
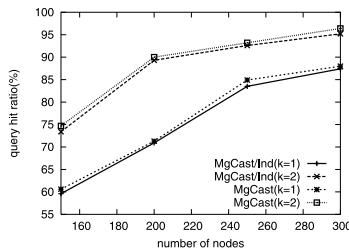
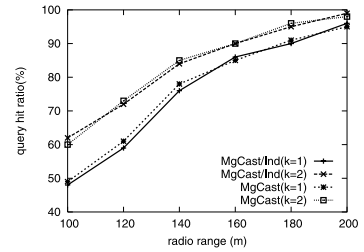
(a) vs. 端末数 ($d = 120, |D| = 1$)(b) vs. 端末数 ($d = 120, |D| = 3$)(c) vs. 無線範囲 ($n = 150, |D| = 3$)

図 6 経路発見率

Fig. 6 Query hit ratio.

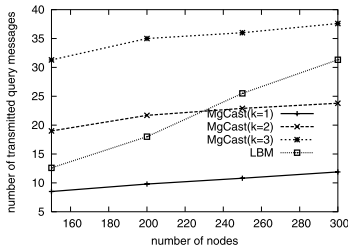
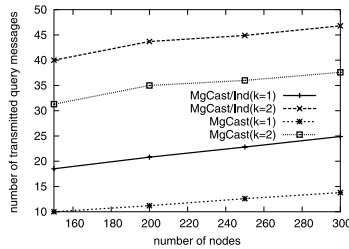
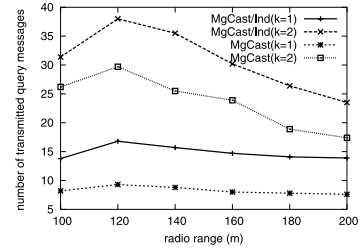
(a) vs. 端末数 ($d = 120, |D| = 1$)(b) vs. 端末数 ($d = 120, |D| = 3$)(c) vs. 無線範囲 ($n = 150, |D| = 3$)

図 7 経路探索メッセージ数

Fig. 7 Number of transmitted query messages.

単数の宛先領域を対象としているため、複数の宛先領域に対しては、各宛先領域に対して、個別に経路探索手続きを実行するように MgCast を修正したものを利用した（これを以下“MgCast/ind”で表す）。

5.2 経路探索手続きの評価

端末数 n を変化させたうえで、(a) 宛先領域数 $|D|$ が 1 の場合に LBM と比較した経路発見率、および (b) $|D|$ が 3 の場合に MgCast/ind と比較した経路発見率を測定した。さらに (c) 無線範囲 d を変化させた場合の (b) の経路発見率を測定した。測定した結果を図 6 に示す。なお k は転送次数を表す。また同じシミュレーションで測定した経路探索メッセージ数を図 7 に示す。

図 6(a) および図 7(a) より、MgCast では、転送次数 k の値が大きいほど経路発見率が高いが経路探索メッセージ数も多いことが確認できる。LBM と比較した場合、たとえば $k = 2$ で端末数 $n = 250$ において MgCast はほぼ同数の経路探索メッセージで約 16% 高い経路発見率を達成している。一般に端末数が少ない場合、LBM では経路探索メッセージが少なくなる代わりに経路発見率が減少し、反対に端末数が多い場合は経路探索メッセージが増加するが、MgCast では各端末が隣接端末を把握しその数にかかわらずほぼ定数個のメッセージを転送しているため、経路探

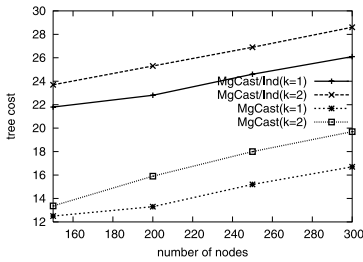
索メッセージ数が抑えられており、またそれらのメッセージをなるべく互いに異なる方向に転送しているため経路発見率も LBM より高い。これらの工夫により全般に LBM よりもバランスの良いトレードオフを達成していることが確かめられた。

また、図 6 (b) および図 7 (b)、図 6 (c) および図 7 (c) より、複数の宛先領域に対する MgCast の経路探索メッセージ数は MgCast/ind より低く抑えられている（たとえば $k = 2$ 、端末数 $n = 250$ において MgCast/ind の約 80%）。これは、MgCast/ind は $|D|$ 回の経路探索手続きを独立に試行する必要があることから、経路探索メッセージ数は各経路探索手続きに要する経路探索メッセージ数の和に近い数となるためと考えられる。その一方で MgCast は MgCast/ind とほぼ同じ経路発見率を達成しており、複数の宛先領域に対し効率良く経路を発見できる MgCast の有効性が示されている。

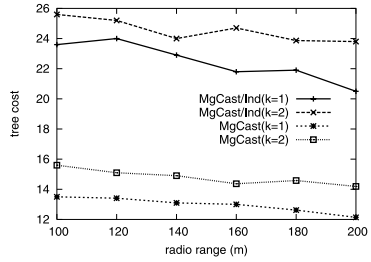
5.3 経路木の評価

$|D|$ が 3 の場合に MgCast/ind と比較した経路コストを、(a) 端末数 n を変化させた場合、(b) 無線範囲 d を変化させた場合それぞれについて測定した結果を図 8 に示す。

いずれの結果においても、経路コストはおおよそ端末数に比例して増加し、無線範囲に比例して減少して

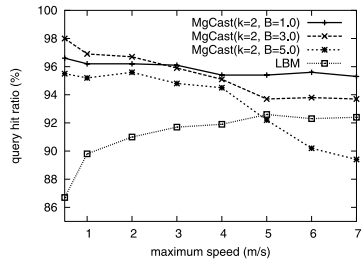


(a) vs. 端末数 ($d = 160, |D| = 3$)

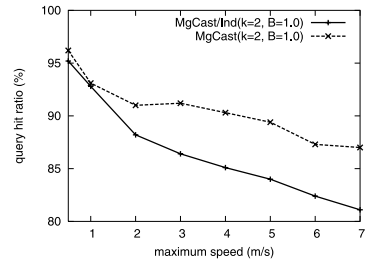


(b) vs. 無線範囲 ($n = 150, |D| = 3$)

図 8 経路木のコスト
Fig. 8 Tree cost.

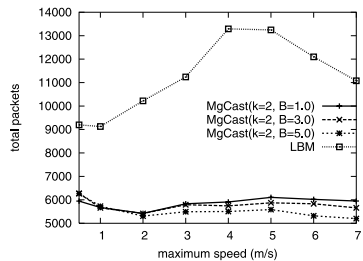


(a) vs. 最大移動速度 ($n = 150, d = 160, |D| = 1$)

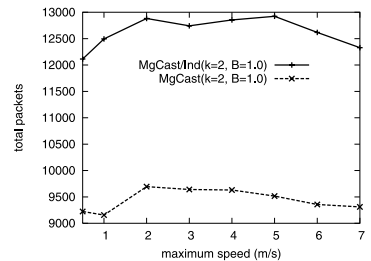


(b) vs. 最大移動速 ($n = 150, d = 160, |D| = 3$)

図 9 経路維持率
Fig. 9 Query hit ratio under mobility.



(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 総メッセージ数
Fig. 10 Number of total messages.

いるが、MgCast においては MgCast/ind より経路コストが低く抑えられている (たとえば $k = 2$, 端末数 $n = 250$ において MgCast/ind の約 67%)。

5.4 経路管理機能の評価

MgCast は経路管理を行うプロトコルであり、端末の移動による経路の切断に対しても切断を検知したノードが経路の部分的な再探索を行うことで経路維持を試みる。本節では、この再探索を含めた経路発見率 (経路維持率) を測定することで、どの程度経路を維持できているかを評価した。端末の最大移動速度を変化させた場合の (a) $|D| = 1$ および (b) $|D| = 3$ での経路維持率を図 9 に示す。また、同じシミュレーションで測定した総メッセージ数を図 10 に示す。なお、

hello メッセージを交換する秒間隔を B で表す。

図 9 (a) より、 B の値が小さいほど隣接端末の位置情報の精度があがり、経路維持率は高くなることが確認できた。また、最大移動速度が大きくなると経路維持率は減少することも確認できた (たとえば $B = 3.0$ s, 最大移動速度 7.0 m/s の場合、最大移動速度 1.0 m/s の場合の約 92%)。なお、LBM は経路管理を行わないため、経路切断ごと新たに経路を生成するようにしたが、 B が 3.0 以下の場合には LBM よりも高い経路維持率を達成している。一方で、図 9 (b) より、MgCast の総メッセージ数は $B = 3.0$, 最大移動速度 7.0 m/s の場合で LBM の約 52% に抑えられている。これは、もともと LBM が多数の経路探索メッセージを要するこ

とに加え、経路管理を行わず、経路切断ごと新たに経路を生成することに起因する。以上より、MgCastの経路管理による経路維持の有効性が確かめられている。

また図9(b)において、最大移動速度7.0m/sの場合MgCastはMgCast/indと比較し約5%高い経路維持率を達成しながら、総メッセージ数をMgCast/indの約75%に抑えている。これは5.2節と同様の理由によるものと考えられる。

5.5 実際の地理情報を用いた評価

MgCastの実環境での有用性を示すために、本論文ではさらに、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。

MANETシミュレーションにおいて主流であるrandom waypoint 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。たとえば、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。現実的なアプリケーションを考慮した場合、シミュレーション実験においても障害物を仮定した適切な移動モデルを用いることが望ましい。

文献10)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を用いて経路維持率と総メッセージ数を測定した。測定した結果を図12および図13にそれぞれ示す。なお、送信端末がパケットを送信する間隔を2秒とした。

これらの結果より、obstacle modelを用いた場合のMgCastとMgCast/indの関係はrandom waypoint modelでのそれとほぼ同様であるが、obstacle modelにおけるMgCastの経路維持率はrandom waypoint modelにおけるそれより最大で約6%高く、総メッセージ数はその約93%に抑えられた。obstacle modelでは端末が配置される領域および移動する領域が障害物により限定されることで、同じ端末数であればrandom waypoint modelより部分的な端末密度が高くなり、経路が限定される。このことが良い影響を与えるものと考えられる。

6. おわりに

本論文では、モバイルアドホックネットワークにお

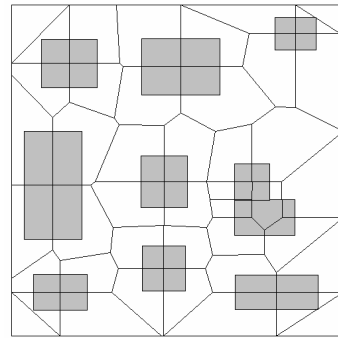
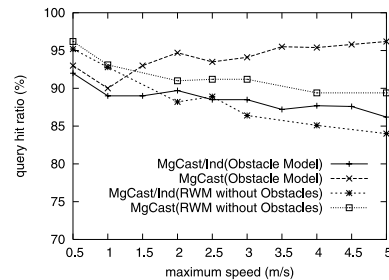


図 11 大阪大学キャンパスをモデル化したシミュレーション空間モデル

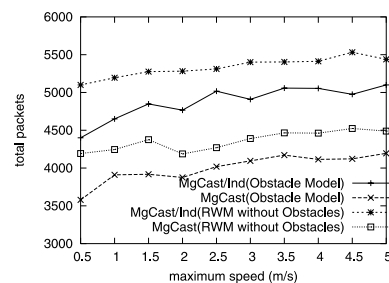
Fig. 11 Simulation model of the campus of Osaka University.



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

図 12 経路維持率 (障害物モデル)

Fig. 12 Query hit ratio under mobility (in obstacle model).



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

図 13 総メッセージ数 (障害物モデル)

Fig. 13 Number of total messages (in obstacle model).

ける、複数の地理的な領域に対する位置情報マルチキャストプロトコルMgCastを提案した。MgCastでは、各端末が自身とその隣接端末群の位置情報を把握し、定数個の隣接端末のみをメッセージ転送端末として指定した経路探索メッセージをブロードキャスト送信する。この際、宛先領域への距離と方向から適切な端末を選択することで、経路探索メッセージ数を抑えながら高い経路発見率を達成する。また、複数の宛先

領域に対し, なるべく総リンク数が少なくなるような経路木を分散構築することで, データパケット総数を少なくする.

MgCast では, 各端末が GPS などで正確な位置情報をつねに取得できるものとしているが, GPS を搭載しない端末が混在したり, GPS の精度や位置情報の取得タイミングによっては位置情報が正確でない場合も考えられる. 前者の GPS 未搭載端末の存在についての問題に対しては隣接端末からの位置情報でおおよその位置を補完する方法が考えられるが, 正確な位置情報が得られないという点で後者の問題と同じである. したがって, 後者の状況を仮定したもとの MgCast が理想的な場合と比較してどの程度の性能を達成できるかをシミュレーション実験で確かめることが今後の課題としてあげられる. また, 現実の位置情報アプリケーションシナリオを考慮したシミュレーション実験を行うことも今後の課題である.

参 考 文 献

- 1) Toh, C.-K.: *Ad-hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*, Prentice Hall (2002).
- 2) Mauve, M., Widmer, J. and Hartenstein, H.: A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks, *IEEE Network Magazine*, Vol.15, No.6, pp.30–39 (2001).
- 3) Ko, Y.-B. and Vaidya, N.H.: Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. 4th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'98)*, pp.66–75 (1998).
- 4) Ko, Y. and Vaidya, N.H.: GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE Int. Conf. on Network Protocol (ICNP2000)*, pp.240–250 (2000).
- 5) Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, *Proc. 6th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000)*, pp.243–254 (2000).
- 6) Chen, K. and Nahrstedt, K.: Effective Location-Guided Tree Construction Algorithms for Small Multicast in MANET, *Proc. IEEE INFOCOM 2002* (2002).
- 7) Ko, Y.-B. and Vaidya, N.H.: Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks; Location-Based Multicast Algorithms, *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA'99)*, pp.101–110 (1999).
- 8) 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).
- 9) Chang, C.-Y. and Tu, S.-C.: Obstacle-Free Geocasting Protocols for Single/Multi-Destination Short Message Services in Ad Hoc Networks, *Wireless Networks*, Vol.9, No.2, pp.143–155 (2003).
- 10) Jardosh, A., Royer, E.M., Almeroth, K.C. and Suri, S.: Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks, *Proc. 9th ACM/IEEE Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2003)*, pp.217–229 (2003).

(平成 15 年 11 月 28 日受付)

(平成 16 年 9 月 3 日採録)

推 薦 文

本論文では, 複数の特定地域に位置する移動端末群へのアドホックマルチキャスト経路構築法の検討を行い, シミュレーションにより提案した手法の有効性を示している. 経路探索をする際に隣接端末の位置情報を利用し, 安定した経路発見率を保ちながら不要なメッセージを抑制するとともに, マルチキャスト経路木のコストを小さくする手法を明らかにしており, 優秀な論文として推薦する.

(DICOMO2003 プログラム委員会委員長 高橋 修)

水本 明



平成 14 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業. 平成 16 年同大学院大学院博士前期課程修了. 現在, 三洋電機株式会社勤務.

山口 弘純 (正会員)



平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業. 平成 10 年同大学院大学院博士後期課程修了. 工学博士. 同年オタワ大学客員研究員. 現在, 同大学院大学院情報科学研究科助手. 分散システムや通信プロトコルの設計および実装に関する研究に従事.



廣森 聡仁（正会員）

平成 11 年大阪大学基礎工学部情報科学科中退．平成 13 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．平成 16 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．工学博士．平成 15 年より日本学術振興会特別研究員．通信プロトコル，ネットワークシミュレーションに関する研究に従事．



谷口 健一（正会員）

昭和 40 年大阪大学工学部電子工学科卒業．昭和 45 年同大学大学院博士課程修了．同年同大学助手．現在，同大学大学院情報科学研究科教授．工学博士．この間，計算理論，ソフトウェアやハードウェアの仕様記述・実現・検証の代数的手法および支援システム，関数型言語の処理系，分散システムや通信プロトコルの設計・検証法等に関する研究に従事．
