

MANETにおける位置推定法 UPL を用いた データ転送プロトコルの検討

内山 彰 藤井 彩恵 梅津 高朗 山口 弘純 東野 輝夫

大阪大学大学院情報科学研究科

本稿では、我々の研究グループが提案している移動端末の位置推定法 UPL を用いたデータ転送プロトコルの検討を行う。UPL では、各移動端末が自身の推定存在範囲を定期的に周辺端末に通知し、その情報を互いに利用することで、位置推定を行う。一方、多くの位置情報ルーティングでも、隣接端末の位置情報を利用するため各端末は定期的に Hello メッセージを送信する。従って、そのような位置情報ルーティングの Hello メッセージに推定存在範囲を付加し、各移動端末に UPL に基づく位置推定を行わせることで、位置情報を低コストで取得しながら効率良くデータ転送を行えるプロトコルを実現できる。位置情報ルーティング GPSR に対して、UPL を適用した場合と、正確な位置情報が取得できる場合との比較を行い、性能がどのように変化するかを調査した。その結果、グリーディ・モードでは正確な位置情報を適用した場合と遜色ない性能が達成でき、ペリミータ・モードでは性能が約 20%低下することが分かった。

A Study on Geographic Routing Protocols using Localization Technique in MANETs

Akira Uchiyama, Sae Fujii, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University

In this paper, we investigate geographic routing protocols using a localization algorithm called UPL. In UPL, landmarks that provide accurate location information to mobile nodes are assumed. Then using hello messages exchanged by the mobile nodes, they inform each other of their possible areas of presence and localization is done by themselves based on the information. Knowing the fact that in many geographic routing protocols, mobile nodes exchange hello messages in order to collect their neighbors' information, we consider the integration of those geographic routing protocols with UPL to mitigate the cost of acquiring positions on mobile nodes. We have applied UPL to a known geographic routing protocol GPSR and evaluated its performance compared with GPSR where accurate positions were obtained by mobile nodes periodically through simulation. The experimental results have shown that the combination of GPSR and UPL could achieve reasonable performance in the greedy mode while its performance decreases 20% in the perimeter mode.

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) と呼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。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ができ、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・離脱等を行うと考えられるため、ネットワークトポロジも頻繁に変更される。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。

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, 2, 3]。位置情報ルーティングでは宛先端末と自端末の位置情報などを用いて、どの端末に経路探索メッセージを転送すべきかを決定する。

しかし、既存の位置情報ルーティングは、GPS 等により各端末が自身の位置を把握しておく必要がある。一般に、電力やコストに制約がある携帯端末や移動センサーノードにとって、GPS 等により常に自端末の位置を把握し続けることは非常に高

コストであり、現実的ではない。また、アドホックネットワークによる補助のもとで、無線の受信電力等を用い、低コストで端末の位置推定手法を行う方法 [4, 5] を応用することも考えられるが、その多くは端末間での協調のために新たなメッセージ交換が必要となり、同様に端末での電力コスト等が課題となる。

我々の研究グループでは、都市環境における歩行者を対象とした位置推定手法である UPL [6, 7] (Urban Pedestrians Localization) を提案してきている。UPL では、位置基準となる端末 (ランドマーク) が適当数存在すると仮定する。このもとで、各端末は自身が存在している領域 (存在範囲) を管理し、遭遇端末の存在範囲を利用することで、高精度な位置推定を実現する。具体的には、各端末は辺端末に対し自身の存在範囲情報を Hello メッセージとして送信する。他端末からの Hello メッセージを受信した端末は、その端末の存在範囲を用いて自身の存在範囲を狭小化し、より推定精度を高めることができる。ここで、位置情報ルーティングのうち、GPSR [1] など特定の隣接端末を選択してメッセージを転送するプロトコルは、隣接端末の存在及びその位置を知るために、自端末の位置情報を含めた Hello メッセージを隣接端末と交換する。従って、そのような Hello メッセージに UPL で用いる存在範囲情報を付加するだけで、新たな制御メッセージの交換等を必要とすることなく端末の位置を取得可能となり、それを利用した位置情報ルーティングを実現できる可能性がある。

そこで本稿では、GPSR のような隣接端末の位置情報を利用する位置情報ルーティングに UPL を応用し、位置情報の取得にかかるコストが低く、かつ GPS のように比較的精度の高い位置情報を用いた場合と遜色ないデータ転送プロトコルを実現するための手法について検討する。位置情報の取得に UPL を利用することで、GPS などの電波が届かないような地下街などにおいても、位置情報ルーティングを利用することができるのみならず、位置情報取得にかかる端末のハードウェアコスト及び電力コストを削減し、全体として低コストな位置情報ルーティングを実現する。

UPL の適用対象として GPSR を用い、人の行動をユーザ記述可能なネットワークシミュレータ MobiREAL [8] を用いてシミュレーションを行った。全端末が常に正確な位置情報を利用できる理想的

な環境、ならびに、適当な時間間隔で正確な位置情報を利用できる環境で動作させた GPSR と比較することで、UPL を用いた GPSR がどの程度の性能を達成できるかを調査した。その結果、自由空間においては UPL を用いた場合でも、適当な時間間隔で正確な位置情報を利用できる環境とほぼ同等のメッセージ到達率が得られることが確認できた。また、障害物が存在する領域では、GPSR のペリミタ・モードが正しく動作しない場合があり、正確な位置情報を取得できる環境と比べて、性能が約 20% 低下することが分かった。

2 関連研究

これまでに数多くの位置情報ルーティングが提案されており、文献 [9] では、様々な位置情報ルーティングについて、スケーラビリティや配送保証性についての考察が述べられている。また、文献 [10] では、宛先となる他端末の位置情報を取得するための位置情報サービスを含めた位置情報ルーティングに関する調査を行っている。

GPSR [1] はよく知られている位置情報ルーティングプロトコルの一つであり、隣接端末の正確な位置情報が得られることを仮定し、グリーディに宛先に近い隣接端末を転送先端末として決定する。GPSR では、障害物などの原因により端末が存在しない領域があり、グリーディに転送先端末を決定できない場合でも、ペリミタ・モードと呼ばれる転送先ノード決定アルゴリズムに切り替えることで、そのような領域を迂回して宛先までメッセージを届けることができる。

また、LAR [3] は、隣接端末の情報を用いない位置情報ルーティングを提案している。LAR では経路探索メッセージを、Request Zone と呼ばれる地理的な範囲内でのみフラッディングすることで、経路探索に必要なオーバーヘッドを削減している。

位置情報の精度と位置情報ルーティングの関係についても研究がなされている。文献 [11] では、疎なネットワークにおいて位置情報誤差が GPSR や GHT [12] に与える影響について、ペリミタ・モードを対象とした考察を行っており、簡易な修正によって位置情報誤差に対応可能であることを示している。文献 [13] では、端末の移動によって生じる位置情報誤差が原因で、GPSR が正しく動作しない場合があることを示している。また、解決法として過去の位置情報から隣接端末の速度ベクトル

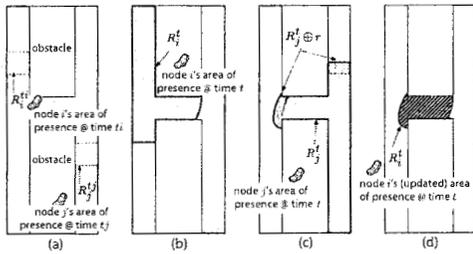


図 1: UPL による位置推定例

を予測する仕組みを提案している。

このように、これまでには位置情報ルーティング及び位置情報誤差がそれらに与えるについての研究がなされてきたが、低コストで位置推定を行いながら位置情報ルーティングを実現する方法についての研究はほとんどなされていない。文献 [2] では、端末の絶対座標が分からなくても、相対的な位置情報を利用して各端末の仮想座標を決定する方法を提案しており、仮想座標を用いることで位置情報ルーティングを実現できる。しかし、仮想座標決定のためにネットワーク全体にフラッディングを複数回行わなければならない、オーバーヘッドが大きい。UPL は各端末が隣接端末に Hello メッセージをブロードキャストするだけで位置推定が可能である。従って隣接端末の位置情報を利用した GPSR などのルーティングプロトコルには、Hello メッセージのヘッダに位置推定のための情報を付与するだけで応用可能であり、親和性が高い。

3 UPL と GPSR の概要

3.1 UPL の概要

以降、議論の簡単のため、全端末の無線到達距離は同じものとし、これを r で表す。また、端末の最大速度を V_{max} で表し、時刻 t における端末 i の存在範囲を R_i^t とする。

ランドマークを含む各端末はその隣接端末に対し、一定の時間間隔 T で Hello メッセージをブロードキャストする。端末 i が時刻 t に送信した Hello メッセージには端末 i が最後に位置推定を行った時刻 t_i から時刻 t までの経過時間 $\Delta t_i = t - t_i$ と存在範囲 $R_i^{t_i}$ の情報が含まれるものとする。端末 i がランドマークであれば、 Δt_i は 0、 $R_i^{t_i}$ はランドマークの正確な位置座標である。 Δt_i は端末 i が保持するタイマによって計算されるため、端末間の時刻同期は不要である。また、もし対象領域の障害物

地図 M が利用可能な場合、それを Hello メッセージに含める。UPL では、障害物間の複雑な形状の領域における端末の移動を考慮するため、存在範囲の形状が既存手法と比べて複雑となる。このため、対象領域をグリッドに分割し、グリッドの集合によって存在領域や障害物地図を表す簡潔なデータ構造を採用し、位置推定アルゴリズムの軽量化を図る。

ランドマーク以外の端末 i が端末 j からの Hello メッセージを受信した際、端末 i は即座に以下に述べる UPL アルゴリズムを実行し、自身の存在範囲を狭小化する。UPL アルゴリズムは以下の通りである。端末 i が Hello メッセージを受信した時刻を t とすると、この Hello メッセージには端末 j が時刻 t_j に更新した (狭小化した) 存在範囲 $R_j^{t_j}$ と時刻 t_j からの経過時間 Δt_j が含まれる。端末 i は、自身の存在範囲 $R_i^{t_i}$ と Hello メッセージに含まれる $R_j^{t_j}$ 、及び障害物地図 M (図 1 (a)) から、それぞれ $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j}$ を計算し、更に $R_j^{t_j}$ を基に、時刻 t において端末 j からの電波を受信可能な領域を計算する (図 1 (b) 及び (c))。この領域は、 $R_j^{t_j}$ を無線到達距離 r だけ拡張することにより計算され、以下 $R_j^{t_j} \oplus r$ で表す。端末 i は $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j} \oplus r$ の両方に含まれるため、 $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j} \oplus r$ の共通領域を、時刻 t における端末 i の存在範囲とする。この操作により存在範囲が狭小化される (図 1 (d))。

ここで、 $R_i^{t_i}$ が時刻 t における端末 i の位置を含むとき、かつそのときに限り $R_i^{t_i}$ は完全であるという。更に、時刻 t における端末 i の 2 つの完全な存在範囲 $R_i^{t_i}$ と $\hat{R}_i^{t_i}$ に対し、 $|R_i^{t_i}| < |\hat{R}_i^{t_i}|$ ならば、 $R_i^{t_i}$ は $\hat{R}_i^{t_i}$ よりも正確であるという (ただし、 $|R_i^{t_i}|$ は $R_i^{t_i}$ の面積を表す)。UPL では、可能な限り完全で、かつ正確な端末の存在範囲を決定することを目標としている。

なお、端末の推定位置を提示する必要があるサービスでは、存在範囲の中で最も存在する可能性が高い位置を決定する位置決定関数を用いる。存在範囲 R と障害物地図 M から、存在する可能性が最も高いと推定される点 p を決定するために、次の関数を用いる。

$$\text{select } p \in R \text{ that minimizes } \max_{p' \in R} \text{dist}(p, p') \quad (1)$$

$\text{dist}(p, p')$ を障害物地図 M 上での点 p と点 p' 間の最短距離 (障害物による移動不可能領域を考慮した上での最短距離) とする。 R が完全であれば、定

```

GreedyMode( $i, d$ )
1 mindist = dist( $l_i, l_d$ );
2 minid =  $i$ ;
3 foreach( $n \in \text{NeighborList}$ ) {
4   if dist( $l_n, l_d$ ) < mindist {
5     mindist = dist( $l_n, l_d$ );
6     minid =  $n$ ;
7   } // グリーディに転送先端末を検索
8 if (minid !=  $i$ ) // 最も宛先に近い端末へ転送
9   SendTo(minid);
10 else // これ以上近づけない
11   PerimeterMode( $i, d$ );

```

図 2: GPSR の転送アルゴリズム

```

Planarize( $i$ )
1 foreach( $n \in \text{NeighborList}$ ) {
2   foreach( $w \in \text{NeighborList}$ ) {
3     if ( $w = n$ ) continue;
4     else if (dist( $l_i, l_n$ )
5       > max[dist( $l_i, l_w$ ), dist( $l_n, l_w$ )]) {
6       eliminate edge( $i, n$ );
7       break;
8     }
9   }
10 }

```

図 3: 相対近傍グラフ生成アルゴリズム

義よりその端末の実際の存在位置が R 内に存在する。UPL では完全な存在範囲を決定することを目指しているため、 R 内の任意の点 p' との最大距離を最小とするような点 p を選択すれば、位置推定誤差を抑えられる。なお、 R 内の任意の点を対象にすると計算コストが増大するため、 R に含まれるグリッドの重心（対角線の交点）のみを候補とする。

なお、UPL の詳細については文献 [6, 7] を参照されたい。

3.2 GPSR の概要

以下では、メッセージ送信を開始する端末は、宛先の位置情報を知っているものとし、端末 i の位置を l_i で表す。なお、宛先の位置情報を取得するためには MLS[14] などの位置情報サービスを用いれば良い。あるいは、あらかじめ登録されている場合も考えられる。

GPSR では、各端末は隣接端末の位置情報を ID との組にして登録した隣接端末リストを管理する。隣接端末リストは各端末が定期的に発信する Hello メッセージによって更新される。GPSR の基本的な転送アルゴリズムを図 2 に示す。GPSR で端末 i が宛先 d へメッセージ転送を行う場合は、 i が保持している隣接端末リストを使って i より宛先端末に近い

く、かつその中でも最も宛先端末に近い隣接端末を次の転送端末とする。これをグリーディ・モードと呼ぶ。グリーディ・モードにおいてそのような端末を発見できなければ、以下で述べるペリミータ・モードを用いて転送端末を決定する。

ペリミータ・モードでは、ネットワークトポロジから平面的グラフ [15] を生成し、右手の法則に従ってメッセージを転送することにより、空白地帯を迂回して宛先へ近づくような経路を探索する。平面的グラフは交差する辺が存在しないグラフであるため、グラフが連結であれば、右手の法則によって必ず宛先へたどり着くことができる。平面的グラフは、図 3 に示すアルゴリズムにより、隣接端末の位置情報を基に各端末でローカルに計算可能である。このアルゴリズムでは、相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph, RNG) と呼ばれる平面的グラフが生成される。相対近傍グラフ生成アルゴリズムは、端末 i と隣接端末 n それぞれの無線範囲内に、他の隣接端末 w が存在しない場合のみ、辺 (i, n) をグラフに含める手順を繰り返す。

4 UPL を応用した GPSR の設計方針

GPSR では隣接端末リストを更新するため、定期的に Hello メッセージを隣接端末へブロードキャストする必要があるが、UPL の Hello メッセージには隣接端末の存在範囲が付与されている。そのため、UPL の Hello メッセージと GPSR の Hello メッセージを統合することで新たなメッセージ送信を行うことなく、GPSR で位置情報を利用可能となるようにする。

Hello メッセージには、端末の存在範囲とその存在範囲を更新してからの経過時間が含まれる。存在範囲を表すために必要なデータサイズは、例えば $100m \times 100m$ の領域でグリッドサイズが $2m \times 2m$ であれば、全てのグリッドについての情報を含めたとしても 2.5 キロビットで事足りる。また、経過時間は数ビットで表現できるため、Hello メッセージは高々数キロビットとなる。

隣接端末の位置情報管理、及び UPL を用いた自身の位置推定を行うため、各端末は以下の処理を定期的に行う。

- (1) 端末 i が隣接端末 j から Hello メッセージを受信した場合、UPL を実行し、 R_i と $R_j \oplus r$ の共通領域を新たな R_i として更新する。
- (2) 端末 i は j の存在範囲 R_j と、更新した自身

表 1: シミュレーション設定

無線半径 (r)	10 (m)
帯域幅	1Mbps
Hello メッセージ送信間隔	1 (sec.)
グリッドサイズ (UPL)	2m × 2m

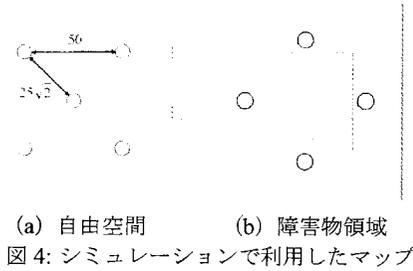


図 4: シミュレーションで利用したマップ

の存在範囲 R_i から計算可能な通信可能範囲 $R_i \oplus r$ の共通領域をとり、新たな R_j として更新する。

- (3) (1) 式の位置決定関数を用いて R_j から j の推定位置座標を決定し、ID との組にして隣接端末リストに追加する。

以上のようにして、新たなメッセージ交換を行うことなく、UPL を GPSR に応用できる。

5 性能評価

5.1 評価環境

UPL を GPSR に適用した場合 (以降、単に UPL と表記) について、ネットワークシミュレータ MobiREAL[8] により性能評価を行った。比較対象は以下の 2 種類である。

IDEAL 各端末は常に自身及び隣接端末の正確な位置を、リアルタイムかつメッセージ交換なしで得られる環境で動作させた GPSR。実際にはこのような環境は現実的ではないが、位置誤差等の外部要因がない場合の GPSR の性能の指標とするために比較対象とした。

GPS 各端末が自身の位置を常に把握でき、隣接端末の位置情報は定期的な Hello メッセージにより取得できる環境で動作させた GPSR。例えば各端末が GPS のような測位機器を利用して、(正確な) 位置を常に取得できる環境を想定している。Hello メッセージの送信間隔は UPL の Hello メッセージ送信間隔と同じとした。

シミュレーションの設定は表 1 に示したとおりである。端末数及び移動速度を変化させ、二種類のマップを用いてシミュレーションを行った。一つ目のマップは $100m \times 100m$ の自由空間 (図 4 (a)) であり、UPL の位置推定に用いるランドマークを図 4 (a) の丸印で示した地点に計 5 個配置した。二つ目のマップは自由空間と同じ広さであるが、中央に $50m \times 50m$ の障害物が存在する領域 (障害物領域 (図 4 (b))) である。ランドマークは図 4 (b) の丸印で示した位置に、計 4 個配置した。以上のランドマークは全て固定端末である。その他の端末については、端末が移動する場合はランダムウォークモデル [16] に従うものとした。端末が移動する場合の速度は、 $[0.1, 1.0](m/s)$ の範囲で端末毎にランダムに決定した。UPL で用いる最大移動速度 V_{max} は、端末が移動しない場合は $0(m/s)$ 、移動する場合は $1.0(m/s)$ とした。

以上のような環境で、(i) メッセージ到達率 (宛先に届いたメッセージ数/送信したメッセージ数)、(ii) 到達したメッセージの送信遅延時間を測定した。なお、全てのシミュレーションにおいて、端末の移動のみを 100 秒間シミュレートし、100 秒から 190 秒までの 90 秒間、各ランドマークから毎秒ランダムに選択した他のランドマークへ 512 バイトのデータを送信した。

5.2 自由空間における性能

端末が移動しない場合 自由空間のマップで移動速度を 0 とし、メッセージ到達率と通信遅延時間を測定した結果を、それぞれ図 5、図 6 に示す。この環境において、GPS は全隣接端末から情報を取得できない場合があるという点で、IDEAL と異なる。これは、シミュレーションでコリジョンや電波減衰を考慮しているためである。端末数が 200 より多い場合、UPL、IDEAL、GPS のいずれも、全てのメッセージを同様の通信遅延時間で宛先端末まで転送することに成功している。一方、端末数が 200 の場合、UPL の性能は IDEAL、GPS よりも大幅に低下している。この原因として、端末密度が低くなるほど、ペリミータ・モードでメッセージ転送が行われる場合が多くなるのが考えられる。図 6 において端末数が 200 の時に IDEAL、GPS のメッセージ遅延が大きくなっていることから、経路長が長くなっている (すなわち、ペリミータ・モードでメッセージが転送されている) ことが伺える。文献 [11] で述べられているように、端末の位置情

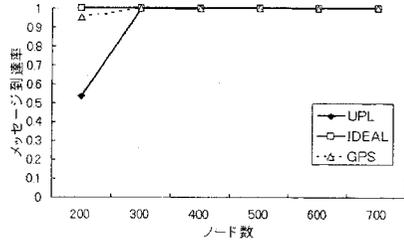


図 5: メッセージ到達率 ($v = 0$)

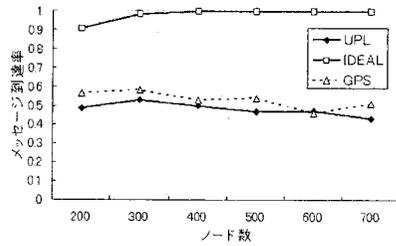


図 7: メッセージ到達率 ($v = rand(0.1, 1.0)$)

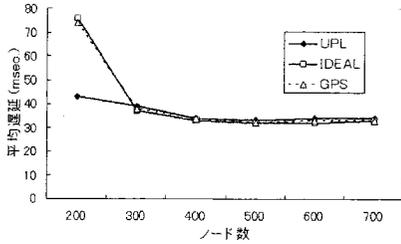


図 6: 通信遅延 ($v = 0$)

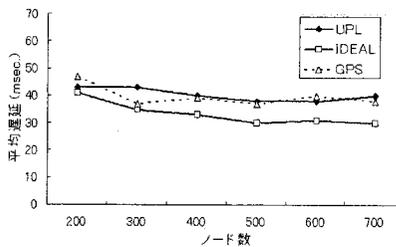


図 8: 通信遅延 ($v = rand(0.1, 1.0)$)

報が正確でない場合にはネットワークトポロジから平面的グラフを生成する際に、ループやネットワーク分断が発生する可能性がある。ペリミタ・モードは平面的グラフにおける右手の法則を前提としているため、ループやネットワーク分断が存在する場合にはメッセージが宛先へ到達できなくなる可能性が生じる。一方で以上の考察により、グリーディ・モードにおいては位置情報に誤差があっても、ほぼ問題なくメッセージ転送が行えることが分かる。

端末が移動する場合 次に、図 7, 図 8 に、同様の環境で各端末の移動速度を $[0.1, 1.0](m/s)$ の範囲でランダムに決定した場合の結果を示す。図 7 より、IDEAL はほぼ $v = 0$ の場合と同じ性能を示しているが、GPS 及び UPL は $v = 0$ の場合と比べてメッセージ到達率が約 50% 低下している。これは、GPS 及び UPL では、隣接端末リストに登録されている隣接端末の位置情報が、端末の移動もしくは位置推定により誤差を含むためである。これは IDEAL の場合は性能が $v = 0$ の場合と比較しほとんど低下していないことからわかる。

隣接端末リストの位置情報の誤差が GPSR の性能に与える影響の主要因の一つとして、隣接端末リストに登録されているが、データ転送時には既に無線範囲外に移動している端末を転送先端末と

して選択してしまう場合が考えられる。 $v = 0$ の場合、位置情報に誤差があったとしても、隣接端末リストに登録されている端末は必ず無線範囲内に存在しているため、少なくとも転送先端末はメッセージを受信できる。しかし、端末が移動する場合、転送先端末が無線範囲外に移動してしまうと、メッセージは棄却される。一方でグリーディ・モードではできるだけ宛先に近い端末を選択するため、無線範囲の境界付近に存在する端末が転送先端末として決定される可能性が高い。無線範囲の境界付近に存在する端末は無線範囲外に移動する可能性が高く、データ転送が失敗する確率が高くなる。従って、端末の移動を考慮して転送先端末を決定することは MANET において位置情報ルーティングを行う際、非常に重要である。文献 [13] では直近の推定位置から隣接端末の移動ベクトルを計算し、メッセージ転送時に無線範囲内に存在すると思われる端末の中から転送先端末を決定する方法を考案しており、このような状況を回避するためのアプローチとして有効である。

また、図 7, 図 8 より、UPL は GPS と遜色ないメッセージ到達率、通信遅延時間を達成できている。従ってこの結果から、GPSR のグリーディ・モードにおいて UPL は十分に有効であると考えられる。

5.3 障害物の影響

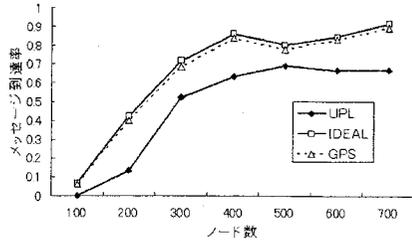


図 9: 障害物領域でのメッセージ到達率 ($v = 0$)

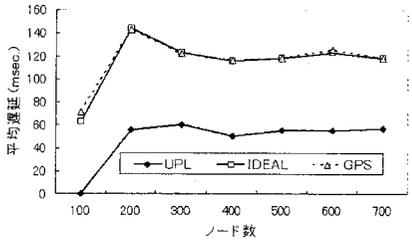


図 10: 障害物領域での通信遅延 ($v = 0$)

端末が移動しない場合 障害物領域において端末が移動しない場合のメッセージ到達率と遅延時間を測定した結果を、それぞれ図 9, 図 10 に示す。

まず図 10 より、どの手法においても自由空間の場合と比べて遅延時間が長くなっていることから、経路長が長くなっていることが分かる。メッセージをやりとりさせるランドマーク間の距離は自由空間の場合とほぼ同様であるため、これはペリミータ・モードでメッセージが転送される場合が多く、なっているということを示す。

また、図 9 より、UPL のメッセージ到達率は IDEAL や GPS よりやや低いが、端末数に対し比較的近い変化を示している。従って、位置情報の取得に UPL を利用した場合でも、ペリミータ・モードで十分利用可能な性能が達成できることが分かる。しかし、図 10 では、UPL のみ通信遅延時間が短くなっている。これは、迂回経路を経由する故に時間のかかるペリミータ・モードが用いられた場合には通信に失敗し、最短経路に近い経路でメッセージが配信されるグリーディ・モードの場合には成功するという傾向があったためと思われる。文献 [11] で指摘されているように、位置情報に誤差がある場合、ペリミータ・モードにおいてループやネットワーク分断が生じることがこの原因の一つであると考えられる。

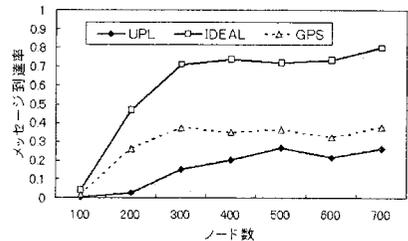


図 11: 障害物領域でのメッセージ到達率 ($v = \text{rand}(0.1, 1.0)$)

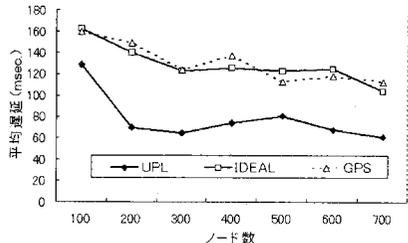


図 12: 障害物領域での通信遅延 ($v = \text{rand}(0.1, 1.0)$)

端末が移動する場合 続いて、同様の環境でランドマークは固定のまま、各端末の移動速度を $[0.1, 1.0](m/s)$ の範囲でランダムに決定した場合の結果を図 11, 図 12 に示す。

GPS, UPL のメッセージ到達率を比較すると、特に低密度な環境において UPL が GPS よりも低い性能を示しており、その差は自由空間の場合よりも大きい。この理由は、これまでと同様に、ペリミータ・モードにおいて位置情報に誤差があるとループや平面的グラフ化によるネットワーク分断が起きてしまい、メッセージを宛先まで届けることができなくなるためである。それでもなお、端末密度が高い状況では、位置推定の精度が向上し、GPS と遜色ないメッセージ到達率が達成できている。

5.4 位置推定誤差

図 13, 図 14 に、自由空間、障害物領域それぞれにおける UPL の平均位置推定誤差を示す。

自由空間においては、障害物が存在しないため、領域の中央付近では、複数のランドマークからの情報が伝搬しやすく、障害物領域に比べて精度が高い。また、端末が移動する場合は、端末が移動しない場合に比べてランドマークに遭遇する機会が増えるため、位置推定誤差が小さくなっている。

更に、図 5, 7, 9, 11 の結果と合わせ、位置推定

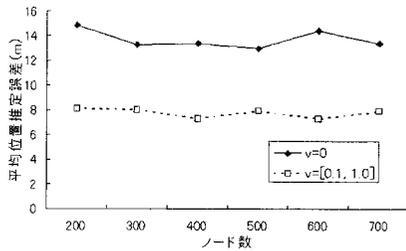


図 13: 自由空間での平均位置推定誤差

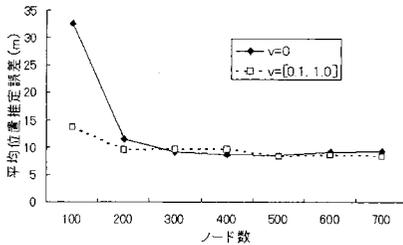


図 14: 障害物領域での位置推定誤差

誤差が 10m 程度であれば、GPSR において正確な位置情報が取得できる環境と同等の性能が得られていることが分かる。ただし、自由空間で端末が移動しない場合については、領域の境界付近の端末がほとんどランドマークから情報を得られないため、平均としてはやや誤差が大きくなっているが、実際にメッセージ転送に関わる端末の位置推定誤差は平均値よりも低い値であると考えられる。

6 おわりに

本稿では、MANET における位置推定手法 UPL をデータ転送プロトコル GPSR に応用し、シミュレーションによりその性能評価を行った。GPS 等で各端末が正確な位置情報を取得できる場合との比較により、UPL は一定の端末密度が確保できる場合であれば、遜色ないメッセージ到達率が達成できることが分かった。しかし、ペリメータ・モードでは性能が約 20% 低下するため、今後ペリメータ・モードにおいてメッセージ到達率を向上させるための工夫を行う必要があると考えている。

参考文献

[1] Karp, B. and Kung, H. T.: GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *Proc. of MobiCom*, pp. 243–254 (2000).
 [2] Rao, A., Ratnasamy, S., Papadimitriou, C., Shenker, S. and Stoica, I.: Geographic routing without location information, *Proc. of MobiCom*, pp. 230–241

(2003).
 [3] Ko, Y.-B. and Vaidya, N. H.: Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks, *Proc. of MobiCom*, pp. 66–75 (1998).
 [4] Hu, L. and Evans, D.: Localization for mobile sensor networks, *Proc. of MobiCom*, pp. 45–57 (2004).
 [5] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D.: GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol. 7, No. 5, pp. 28–34 (2000).
 [6] Uchiyama, A., Fujii, S., Maeda, K., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Ad-hoc localization in urban district, *Proc. of INFOCOM 2007 Mini-Symposium*, pp. 2306–2310 (2007).
 [7] 藤井彩恵, 内山彰, 前田久美子, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫: 少ない基準位置情報を移動無線端末間で補完する都市部向け位置推定手法の提案, 第 14 回マルチメディア通信と分散処理 (DPS) ワークショップ論文集, pp. 67–72 (2006).
 [8] MobiREAL web page: Tools are available on <http://www.mobireal.net>.
 [9] Stojmenovic, I.: Position-based routing in ad hoc networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 7, pp. 128–134 (2002).
 [10] Mauve, M., Widmer, A. and Hartenstein, H.: A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks, *IEEE Network*, Vol. 15, No. 6, pp. 30–39 (2001).
 [11] Seada, K., Helmy, A. and Govindan, R.: On the effect of localization errors on geographic face routing in sensor networks, *Proc. of Information Processing in Sensor Networks*, pp. 71–80 (2004).
 [12] Ratnasamy, S., Karp, B., Shenker, S., Estrin, D., Govindan, R., Yin, L. and Yu, F.: Data-centric storage in sensornets with GHT, a geographic hash table, *Mobile Networks and Applications*, Vol. 8, No. 4, pp. 427–442 (2003).
 [13] Son, D., Helmy, A. and Krishnamachari, B.: The effect of mobility-induced location errors on geographic routing in mobile ad hoc and sensor networks: analysis and improvement using mobility prediction, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 3, No. 3, pp. 233–245 (2004).
 [14] Flury, R. and Wattenhofer, R.: MLS: an efficient location service for mobile ad hoc networks, *Proc. of MobiHoc*, pp. 226–237 (2006).
 [15] Bondy, J. and Murty, U.: グラフ理論への入門, 共立出版 (1991).
 [16] McGuire, M.: Stationary distributions of random walk mobility models for wireless ad hoc networks, *Proc. of MobiHoc*, pp. 90–98 (2005).