

推薦論文

少数の基準位置情報を移動無線端末間で補完する 位置推定手法の提案と評価

藤井 彩 恵[†] 内山 彰[†] 前田 久美子[†]
梅津 高 朗^{†,††} 山口 弘 純^{†,††} 東野 輝 夫^{†,††}

本論文では都市部における移動端末のための位置推定手法を提案する。一般に位置推定手法では、正確な位置情報を発信するノード（位置基準ノード）を仮定し、その基準位置情報を無線アドホックネットワークで複数ホップ伝播させる手法をとる。提案手法では、ネットワークが分断されやすい都市部での利用を想定し、各移動端末は位置基準ノードからの位置情報に加え、遭遇した移動ノードの推定位置情報も位置推定に利用する。また、道路の形状など対象領域の移動可能領域を各移動端末に与え、端末の実移動距離を考慮することで精度向上を図っている。シミュレーションにより評価した結果、位置基準ノードが数十～百メートルの疎な間隔で設置されているような状況でも、位置推定誤差が無線到達距離と同程度以下に抑えられることを確認した。

Proposal and Evaluation of Localization Algorithm for Mobile Nodes and Sparsely Deployed Landmarks

SAE FUJII,[†] AKIRA UCHIYAMA,[†] KUMIKO MAEDA,[†]
TAKA AKI UMEDU,^{†,††} HIROZUMI YAMAGUCHI,^{†,††}
and TERUO HIGASHINO^{†,††}

In this paper, we give basic design of a localization algorithm using mobile ad hoc networks. In most localization techniques, each node uses location information delivered from landmark nodes on mobile ad hoc networks. However, if landmarks are sparsely deployed, mobile nodes cannot always receive location information from the landmarks because mobile ad hoc networks are frequently divided. In our method, each node also uses location information sent from encountered mobile nodes. Moreover, we employ obstacle information to calculate the movable area of each mobile node more accurately. We have evaluated the performance of our method by simulation and confirmed that the average position estimation error was less than the radio range.

1. はじめに

ユビキタス社会において、位置情報は様々なサービスへの活用が期待されている。しかしビルが林立する地区や地下街が存在する都市部では、GPSの精度が十分ではない。このため、これまで数多くの位置推定手法が提案されている。既存手法の多くは、位置基準ノード（以下、基準ノード）が提供する正確な位置情報と基準ノードからの距離などの補助的な情報を併用

して各ノードの位置を推定する。基準ノードからの直接的な情報を利用する手法には、広域に基準位置情報を配信する基準ノードを用いる手法や、電波タグのように安価な短距離無線機器を基準ノードとして多数配置する手法が考えられる。前者の手法では、建物などの障害物が存在する都市部では、離れた基準ノードから無線信号を受信するのが難しい。後者の手法では、基準ノードを多数配置する必要があり、配置および管理コストなどの問題がある。また、文献 1) のように移動する基準ノードを用いて、基準ノードの位置情報の伝播可能領域を拡張する手法もあるが、広い都市部

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

^{††} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST

本論文の内容は 18 年 11 月のマルチメディア通信と分散処理
ワークショップにて報告され、同プログラム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。

において、低速移動する歩行者が移動する基準ノードと頻繁に遭遇することは困難であり、基準位置情報が十分に得られない可能性がある。また、基準ノードからの間接的な情報を利用する手法は、文献 2) を参考に以下の 2 つに分類できる。協調的多点測量 (collaborative multi-lateration) と呼ばれる手法 (たとえば文献 3)) では、無線アドホックネットワーク上で基準ノードの位置情報をマルチホップ伝播し、基準ノードへの距離をホップ数などで近似したうえで位置推定を行う。反復的多点測量 (iterative multi-lateration) と呼ばれる手法 (たとえば文献 4)) では、あるノードの推定位置からその隣接ノードの位置を推定する処理を繰り返し行う。しかし、歩行者や自動車の移動やビルなどの障害物、ノードの不均等な配置・密度の影響により、都市部での無線アドホックネットワークはつねに変化し頻繁に分断される可能性がある。

本論文では都市部における移動ノードのための位置推定手法 UPL (Urban Pedestrians Localization) を提案する。UPL では、基準ノードの情報を直接受信する機会が少なく、かつ無線アドホックネットワークが分断されやすい都市部での利用を想定する。UPL の移動ノード群は、基準ノードからの位置情報だけでなく、遭遇ノード間で交換する互いの推定存在領域情報を利用してそれぞれの推定存在領域の精度を高める。さらに、各ノードに建造物などの障害物情報を与え、推定存在領域の精度をさらに高める工夫をしている。

提案手法の性能をネットワークシミュレータ Mobireal⁵⁾⁻⁷⁾ を用いて評価したところ、実験結果より、UPL は JR 大阪駅前における道路地形、歩行者の密度・行動経路を再現した環境において、無線到達距離 10 m、平均基準ノード配置間隔を約 70 m とした場合、その位置推定誤差は平均で約 7 m 程度であることを確認した。これにより UPL は一定の端末普及率のもとで、歩行者ナビゲーション、位置依存情報取得や安全安心のための児童追跡システムなど、都市部での利用が想定される位置情報サービスに十分適用可能な精度の位置情報を提供できることが分かった。

2. UPL の概要

歩行者は ZigBee や Bluetooth などの PAN 通信デバイスを装備した端末を保持しているものと想定する。これは、近年の Bluetooth 搭載の携帯電話の増加や ZigBee ハードウェアの小型化を考慮した場合、現実的な仮定といえる。以降、議論の簡単のため、すべてのノードの無線到達距離および最大速度は同じであると、それぞれ r_{max} , v_{max} で表す。また、時刻 t に

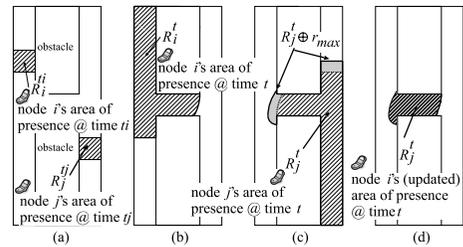


図 1 UPL アルゴリズム

Fig. 1 Localization process of UPL.

おいてノード i が存在すると推測される領域 (推定存在領域, 以下単に存在領域と呼ぶ) を R_i^t で表す。

基準ノードを含む各ノードは一定の時間間隔で Hello メッセージと呼ばれる情報通知メッセージを無線範囲内にブロードキャストする。ノード i が時刻 t に送信した Hello メッセージにはノード 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 $\Delta t_i = t - t_i$ と存在領域 $R_i^{t_i}$ が含まれる。ノード i が基準ノードであれば、 Δt_i は 0、 $R_i^{t_i}$ は基準ノードの正確な位置座標である。なお、 Δt_i は位置推定を行った時刻からの経過時間のみに依存するため、ノード間の時刻同期は不要である。また、基準ノードはあらかじめ障害物地図を保持しているものとし、移動ノードは基準ノードと遭遇時に障害物地図を取得する。ただし、基準ノードと長期間遭遇できないような場合には、要求メッセージを発信して、周辺に障害物地図を保持している端末が存在すれば取得することができる。存在領域と障害物地図のデータ構造は 3.1 節で説明する。

ノード i がノード j からの Hello メッセージを受信した際、ノード i は即座に UPL アルゴリズムを実行し、自身の存在領域を狭小化する。ノード i が Hello メッセージを受信した時刻を t とすると、この Hello メッセージにはノード j が時刻 t_j に更新した (狭小化した) 存在領域 $R_j^{t_j}$ と時刻 t_j からの経過時間 Δt_j が含まれる。UPL では、まずノード i は自身の存在領域 $R_i^{t_i}$ と Hello メッセージに含まれる $R_j^{t_j}$ および障害物地図 M (図 1(a)) から、それぞれ $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j}$ を計算し、さらに $R_j^{t_j}$ をもとに、時刻 t においてノード j からの電波を受信可能な領域を計算する (図 1(b) および (c))。この領域は、 $R_j^{t_j}$ を無線到達距離 r_{max} だけ拡張することにより計算され、以下 $R_j^{t_j} \oplus r_{max}$ で表す。ノード i の存在位置は $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j} \oplus r_{max}$ の両方に含まれるため、 $R_i^{t_i}$ と $R_j^{t_j} \oplus r_{max}$ の共通領域を、時刻 t におけるノード i の存在領域とする。この操作により存在領域が狭小化される (図 1(d))。

ここで、 R_i^t が時刻 t におけるノード i の位置を含

むとき、かつそのときに限り R_i^t は完全であるという。さらに、時刻 t におけるノード i の 2 つの完全な存在領域 R_i^t と \hat{R}_i^t に対し、 $|R_i^t| < |\hat{R}_i^t|$ ならば、 R_i^t は \hat{R}_i^t よりも正確であるという（ただし、 $|R_i^t|$ は R_i^t の面積を表す）。本研究の目的は、可能な限り完全かつ正確なノードの存在領域を決定することである。

3. UPL アルゴリズムの詳細設計

3.1 存在領域と障害物地図のデータ構造

既存の位置推定手法では、存在領域を表すために様々なデータ構造が使用されている。たとえば、MCL¹⁾では、存在領域を表現するために存在領域内からランダムに選択された点の集合を利用する。Sextant⁴⁾は複数の代表点間のベジエ曲線により存在領域を表す。

提案手法では障害物を取り除いて形成される複雑な形状の領域を対象とするため、存在領域の形状が既存手法よりも複雑となる。このため、対象領域を小さなグリッドに分割し、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。また、Hello メッセージ上で存在領域を表現する際には、グリッド全体を 2 次元配列と見なし、存在領域に含まれる各グリッドを配列インデックスで指定することで送信データサイズをなるべく抑制する。なお、単位グリッドの大きさによる使用メモリ使用量や通信量の変化については 5 章で論じる。

3.2 アルゴリズムの説明

自ノードと遭遇ノードの存在領域の計算 ノード j が最後に位置推定を行ってからの経過時間 $\Delta t_j = t - t_j$ 、グリッドの集合によって表される $R_j^{t_j}$ ($t_j < t$) および障害物地図 M が与えられた際に、時刻 t におけるノード j の存在領域 R_j^t を計算するアルゴリズムを示す。以降、このアルゴリズムを APC (Area of Presence Computation) アルゴリズムと呼ぶ。

障害物地図 M の移動可能な領域内の全グリッド集合を FS とすると R_j^t を計算するためには、 $R_j^{t_j}$ からの距離が $v_{max} \cdot \Delta t_j$ 以内である FS のグリッドをすべて R_j^t に加えればよい。しかし、障害物が存在する場合、 FS 内のすべてのグリッドに対し $R_j^{t_j}$ からの正確な最短距離を計算することは複雑であるため、提案手法では $R_j^{t_j}$ にグリッドを逐次追加していき、 R_j^t が求められる近似アルゴリズムとして APC を実現する。

ここで、単語と表記の定義を与える。グリッド g に対して g と 1 辺を共有するグリッドを辺接グリッドとし、 g の辺接グリッド以外で、1 頂点のみを共有す

ようなグリッドを点接グリッドと呼ぶ。また、辺接グリッドと点接グリッドを合わせて隣接グリッドと呼び、グリッドの集合 G 内の各グリッドに対し、その隣接グリッドのうち少なくとも 1 つが G に含まれないようなグリッドを境界グリッドとする。グリッド g に対し、 $d(g)$ を $R_j^{t_j}$ からの最短距離とする。すなわち、 g が $R_j^{t_j}$ 内に含まれるならば $d(g) = 0$ となる。隣接する 2 つのグリッド間の距離はグリッドの中心点どうしのユークリッド距離とする。

APC アルゴリズムでは、 R_j^t を計算するため、まず R_j^t を $R_j^{t_j}$ で初期化する。 w をグリッドの 1 辺の長さとする、 R_j^t の各境界グリッド g に対し、 $d(g) + w \leq v_{max} \cdot \Delta t_j$ ならば、 FS に含まれる g の辺接グリッド g' を R_j^t に加える。 g' を R_j^t に加えた場合、 $d(g') = d(g) + w$ とする。同様に、 g の点接グリッド g'' に対して、 $d(g) + \sqrt{2}w \leq v_{max} \cdot \Delta t_j$ ならば R_j^t に加える。 g'' を加えた場合、 $d(g'') = d(g) + \sqrt{2}w$ とする。そして、 R_j^t に加えられた g' と g'' を FS から削除する。以上の手続きを R_j^t へ加えることのできる R_j^t の隣接グリッドがなくなるまで繰り返す。図 2 に $R_j^{t_j}$ と R_j^t 、 $R_j^t \oplus r_{max}$ の例を示す。また、 $\sqrt{2} \approx 1.4$ とした場合における R_j^t の計算の様子を図 3 に示す。遭遇ノードの電波を受信可能な領域の計算 時刻 t におけるノード j の存在領域 R_j^t を無線到達距離 r_{max} だけ拡張することによりノード j からの電波を受信可能な領域 $R_j^t \oplus r_{max}$ を計算する。都市部での電波の伝播は自由空間と比較して反射波や回折波による電波強度減衰が生じるため、それを考慮したアルゴリズムを設計することが精度の観点からは理想である。しかし、携帯端末など処理能力に制約がある環境では複雑なアルゴリズムを実装することは困難であり、かつ消費電力の観点からも得策ではない。また、通信距離が短い PAN 通信デバイスではそのような減衰は比較的軽微であるといえる。以上より、受信可能な領域を計算するアルゴリズムとして、 R_j^t から距離 r_{max} 以下でかつ R_j^t のいずれかのグリッドから直線で見通せるグリッドのみを $R_j^t \oplus r_{max}$ に追加するように変更した APC アルゴリズムを用いる。

自ノードの存在領域の計算 自ノードの新しい存在領域は R_i^t と $R_j^t \oplus r_{max}$ の共通領域 $R_i^t \cap \{R_j^t \oplus r_{max}\}$ であり、双方の領域に含まれるグリッド集合として得られる。実際の移動速度が v_{max} を超える場合など UPL で仮定した前提条件が成り立たない場合には完全性が満足されず、場合によっては共通領域が空となる可能性がある。共通領域が空となる場合は、拡張計算された自ノードおよび遭遇ノードの存在領域の境界を 1 グ

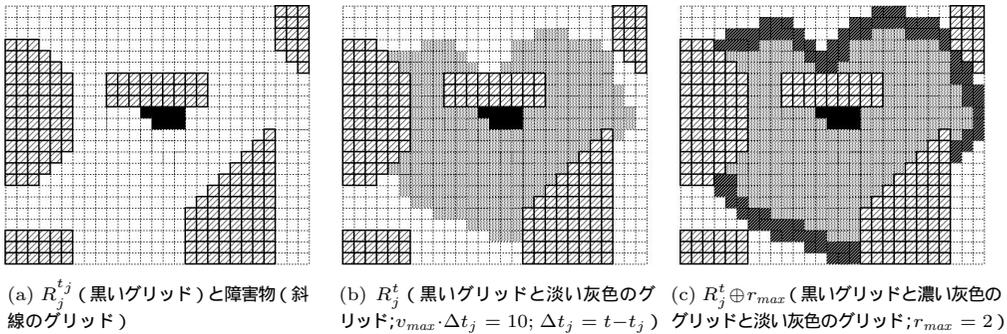


図 2 存在領域の計算と受信可能な領域の計算 (グリッドの辺長 $w = 1$ の場合)

Fig. 2 Computing area of presence and its expansion by communication range ($w = 1$).

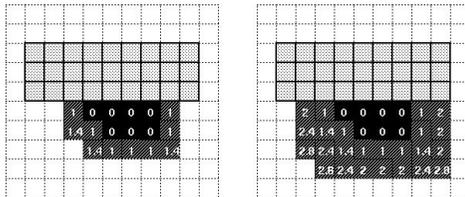


図 3 APC アルゴリズムでの 1 回目と 2 回目の手続き実行後の存在領域 (グリッド内の値は R_j^t からの距離を表す)

Fig. 3 1st and 2nd steps of APC algorithm (value inside a grid represents distance from R_j^t).

リッド分拡張し、共通領域を計算するという処理を共通領域が空でなくなるまで繰り返す。

3.3 精度向上のための工夫

既存手法では、精度向上のための様々な工夫がなされている。UPL では、MCL¹⁾ で提案されている 2 つの手法を採用した。1 つは、基準ノードからのメッセージ受信履歴を用いる手法である。受信履歴から基準ノードの無線到達領域へのノードの出入りを検出できれば、そのノードが基準ノードの無線到達領域の境界付近に存在することが分かる。もう 1 つは、基準ノードからの位置情報を直接受信したノードが隣接ノードにその位置情報を転送する手法である。転送された位置情報のみを受信したノードはそれを直接受信できる領域に存在せず、かつ転送された情報を受信できる領域に存在していることが分かる。

3.4 位置決定関数

ナビゲーションなどのアプリケーションではノードの推定位置を提示する必要がある。ここでは、存在領域の中で存在する可能性が最も高い点を決定する位置決定関数を提案する。存在領域 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。

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

$\text{dist}(p, p')$ 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うえでの最短距離) とする。 R が完全であれば、定義よりそのノードの実際の存在位置が R 内に存在する。後述する実験結果より、提案手法における存在領域は高い確率 (おおよそ 98%) で完全であることから、 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。

4. 性能評価

4.1 評価環境

シミュレーションによる性能評価では、マンハッタン地図 (格子状道路の地図⁸⁾ (図 4 (a)), 中央分離帯地図 (図 4 (b)), 繁華街地図 (図 4 (c)), 自由空間地図 (図 4 (d)) の計 4 つのマップを使用する。マンハッタン地図は、幅 8 m の道路を 8 本持ち、道路以外の領域は移動も通信も遮断する障害物である、500 m × 500 m の正方領域とする。中央分離帯地図は 100 m × 500 m の長方形領域で、中央を縦断する道路には中央分離帯 (移動は遮断するが通信は遮断しない障害物) を設置する。繁華街地図は大阪駅前をモデルとした 500 m × 500 m の領域とし、南東 170 m × 250 m の領域は自由空間とする。自由空間地図は全領域を自由空間とした 500 m × 500 m 領域とする。いずれの領域を用いた実験においても、実験開始前にノードをランダムに配置し、移動ノードのモビリティは、道路上では交差点で後方を除く方向のうちランダムに行き先を決定するモビリティモデルに、自由空間では Random Waypoint モビリティモデル⁹⁾ とする。なお、図 4 の丸を基準ノードのデフォ

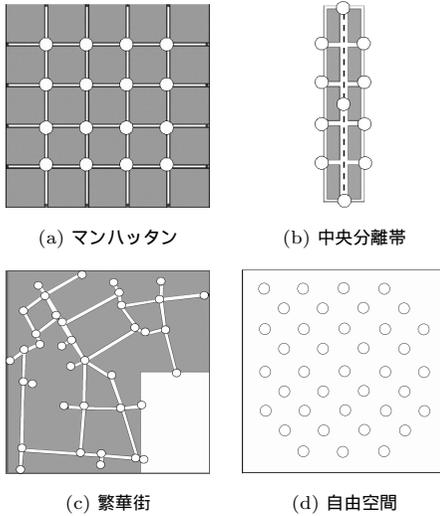


図 4 シミュレーション実験で用いた地図
Fig. 4 Maps used in simulation experiments.

表 1 シミュレーションのパラメータ値
Table 1 Simulation parameters.

全マップ共通 (太字の値をデフォルト値とする)	
無線到達距離 (r)	10 (m)
ノードの移動速度 (v)	正規分布
分散 (v_σ)	0.1
平均 (v_μ)	1.5, 3.5, 5.5, 7.5
グリッドの大きさ (w)	1, 2, 4
マンハッタン (太字の値をデフォルト値とする)	
Hello メッセージ送信間隔	1, 2, 5, 10 (sec.)
ノード数	500, 1,000, 2,000 , 3,000
基準ノード数	8, 12, 16
中央分離帯	
Hello メッセージ送信間隔	5 (sec.)
ノード数	400
基準ノード数	11
繁華街, 自由空間	
Hello メッセージ送信間隔	2 (sec.)
ノード数	500, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000
基準ノード数	38

トの配置位置とする。パラメータの値は表 1 に従う。無線通信モデルは見通し通信モデルとし、ノードが互いを見通すことができ、ノード間の距離が r 以下のときに限り通信できるものとする。また、移動速度 v は (v_μ, v_σ^2) の正規分布 (ただし $v > 0$) とする。また、各ノードが保持する存在領域や障害物地図のデータ構造 (存在領域や障害物地図の絶対座標およびグリッドの大きさ) は同じものとし、シミュレーションでは障害物地図を初めから受信しているものとした。UPL アルゴリズムで用いるパラメータ v_{max} および r_{max}

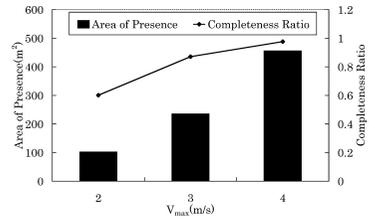


図 5 v_{max} の精度および完全性への影響
Fig. 5 Impact of v_{max} on performance.

はこれらのシミュレーションパラメータ値をもとに、それぞれ $v_{max} = v_\mu + kv_\sigma$ (k は正の実数、デフォルト値は 5), $r_{max} = r$ とした。

本論文では、5 種類のシミュレーション実験を行う。1 つ目の実験では、実際の移動速度 v が想定される速度の最大値 v_{max} を超える場合における完全性を評価する。2 つ目の実験では、UPL の性能特性の評価として、様々なパラメータの変化による精度 (存在領域の正確性) への影響を評価する。3 つ目の実験では遭遇ノードから得られる存在領域情報および障害物情報が精度向上にどの程度寄与しているかを評価する。4 つ目の実験では、既存手法である Amorphous³⁾ および MCL¹⁾ との位置推定誤差の比較を行う。5 つ目の実験では、ノード数が UPL の通信量に与える影響を評価する。完全性は、全ノードでの UPL アルゴリズム実行回数に対し完全な存在領域が得られた回数の割合 (完全性充足率, Completeness Ratio) として評価し、精度は、存在領域 (Area of Presence) の面積として評価する (面積が小さいほど高精度とする)。

4.2 v_{max} が存在領域の完全性と精度に与える影響
マンハッタン地図で移動速度の分散 v_σ を 1.0, 平均 v_μ を 1.5 とし、 v_{max} における k の値を 0.5, 1.5, 2.5 としたときの、完全性および精度を図 5 に示す。UPL アルゴリズムに従えば、任意の時点における全ノードの存在領域は理論上完全である。しかし、領域表現のためのデータ構造としてグリッド集合を用いていることや APC アルゴリズムで近似計算を行っていることから、理論上の存在領域と実装上の存在領域との間に誤差が生じ、実装上の存在領域は必ずしも完全ではない。また、実際の移動速度や無線到達距離が推定時に用いる値 v_{max} および r_{max} を超える場合も完全ではない。評価結果より、 v_{max} を超えるノードの割合が大きいくほど完全性は悪化し、面積が小さくなるのが分かる。これは、完全性が悪化すると自ノードの存在領域と遭遇ノードの電波を受信可能な領域の共通領域が空となるなど、計算された面積が非常に小さくなる場合が多いためである。一方、 $v_{max} = 4$ とした

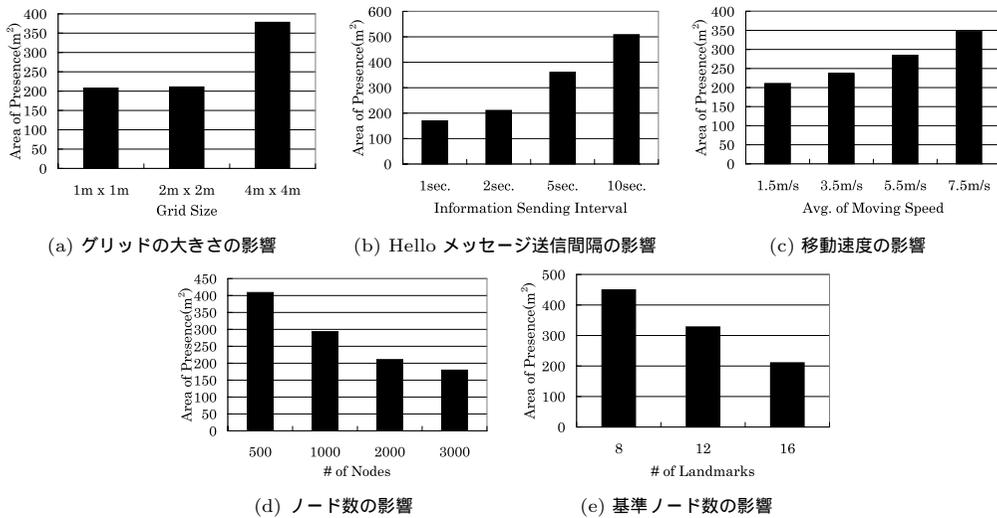


図 6 パラメータ値が UPL の精度に与える影響

Fig. 6 Impact of parameters and environments on performance.

場合, v_{max} を超えるノードが少なくなり, 完全性が高くなるが, 存在領域の面積は大きい. このように完全性と精度の間にはトレードオフの関係がある. v_{max} は全ノード共通の値である必要はなく, ノードごとに独自の値を設定することも可能である. このため, 各ノードが適切な v_{max} の値を設定し, Hello メッセージに v_{max} の値を含めて送信すれば, 完全性・精度ともに高い結果が得られると考えられる.

4.3 パラメータの位置推定精度への影響

ここでは, 完全性が十分確保された状況下において, パラメータの値が精度に与える影響を評価する. 実験にはマンハッタン地図を用いた. 表 1 に示すグリッドの大きさ, Hello メッセージ送信間隔, 移動速度の平均, ノード数, 基準ノード数の 5 つのパラメータについて, 1 つのパラメータを表 1 の範囲で変化させ, 残りのパラメータをデフォルト値としたうえで実験を行った.

グリッドの大きさ グリッドの大きさによる存在領域の面積の変化を図 6(a) に示す. グリッドの大きさを小さくすると, 境界をより正確に表すことができるため, 存在領域の面積は小さくなる. 実験結果より 2m 以下であれば十分に表せることができるため, グリッドの大きさを 2m とするのが適当である.

Hello メッセージ送信間隔 送信間隔による存在領域の面積の変化を図 6(b) に示す. 送信間隔が長くなると得られる情報が少なくなるため, 存在領域の面積は大きくなる (精度は低下する). 実験結果より送信間隔が短いほど精度が高いといえるが, 送信間隔が短すぎるとメッセージ数が多くなることや, 送信間隔が 1

秒の場合と 2 秒の場合で存在領域はほとんど変化しないことから, 送信間隔を 2 秒とするのが適当である. **移動速度** 移動速度による存在領域の面積の変化を図 6(c) に示す. 一般に, ノードの存在領域は移動速度に応じて大きくなると予想され, 図 6(c) からその傾向が読み取れる. これより, 提案手法は比較的低速度で移動するノードの位置推定に適しているといえる. **ノード数** ノード数の増加にともなう存在領域の面積の変化を図 6(d) に示す. ノード数が多い (ノード密度が大きい) ほどより多くのノードと遭遇し, 得られる情報が増えるため, 存在領域が小さくなる. これより, ノード密度と精度には密接な関係があることが分かる.

基準ノード数 基準ノード密度による存在領域の面積の変化を図 6(e) に示す. これより, 基準ノード数の増加にともない, 精度が向上していることが分かる. 1 つの基準ノードが直接情報を送信できる領域は無線到達距離が 10m であることと基準ノードが交差点上に配置されていることから 256 m² であるため, 16 個の基準ノードが直接情報を送信できる領域は全移動可能領域 32,000 m² の 12.8% である. このように基準ノードが疎に配置された状況でも, 存在領域の面積は約 200 m² であり, UPL は高い精度を達成しているといえる.

4.4 遭遇ノードの存在領域情報と障害物情報の影響

ここでは, 遭遇ノードの存在領域情報および障害物

たとえば幅 8 m の道路であれば, 道路上の長さ 25 m の範囲内に存在すると推定されている.

情報がそれぞれ、位置推定の精度向上にどの程度寄与しているかを評価する．そのために、遭遇ノードの存在領域情報を利用しないUPL (UPL_{no_adhoc} で表す) と障害物情報による回りこみ計算を行わないUPL (UPL_{no_obs} で表す) における存在領域の面積を測定した．実験は中央分離帯地図を用い、パラメータの値は表1のデフォルト値を用いた．

まず、同条件のUPLにおける存在領域面積を1としたときの面積比を悪化率(存在領域の増大率)と呼び、これをノードごとに測定した．悪化率をX軸にとり、その悪化率であったノード数が全ノード数に占める割合をY軸にとった分布図を図7に示す．図7より、遭遇ノードの存在領域情報は多数のノードの大幅な精度向上に寄与しているといえる．一方、障害物情報を使用しない場合、約8割のノードの面積が増加することから、障害物情報も精度向上に寄与しているといえる．また、UPL_{no_adhoc} とUPL_{no_obs} の悪化率の平均値は4.811, 1.214であり、平均して存在領域の面積はそれぞれ79%, 19%削減されている．以上より、UPLは遭遇ノードの存在領域情報および障害物情報により精度向上を実現していることが確認できた．

次に、中央の500m長の直線道路に着目し、その道路上におけるノード位置をX軸、対応する悪化率をY軸にプロットしたグラフを図8に示す．図8(a), (b)は、それぞれ道路上の座標ごとにUPLに対する

UPL_{no_adhoc}, UPL_{no_obs} の悪化率を示す．基準ノードは0m, 250m, 500mの位置に存在している．図8(a)から、遭遇ノードの存在領域を利用しない場合、特に基準ノードから離れた場所に存在するノードにおいて、悪化率が大幅に増大していることが分かる．また、図8(b)から、障害物情報を使用しない場合、100m, 200m, 300m, 400mに存在する交差点間の中間点付近のノードで悪化率が増大する傾向があることが分かる．これは、交差点付近では他方向からのノードの存在領域情報が得られるため障害物情報の回りこみ計算を行わない場合でも存在領域の面積を十分小さくすることができるが、交差点間の中間付近では、障害物情報の回りこみを利用しない場合、中央分離帯を挟んだ反対の道路側に存在領域が計算され、領域の面積が大きくなるためと考えられる．

4.5 位置推定誤差

他手法との比較を行うために、UPL, MCL¹⁾, Amorphous³⁾でのノード密度ごとの位置推定誤差を評価した．MCLは移動する基準ノードを仮定する手法であり、Amorphousはホップ数により基準ノードからの距離を近似する手法である．また、UPLでは3.4節で述べた位置決定関数を用いて存在領域からの推定位置を決定する．評価環境は、繁華街地図および自由空間地図を用い、パラメータの値は表1のデフォルト値とする．なお、繁華街地図における平均基準ノード配置間隔は約70mである．

図9に無線到達距離($r = 10m$)に対する位置推定誤差を示す．図9より、各手法とも繁華街地図の方が精度が良い．これは繁華街地図では自由空間地図と比較して移動可能領域が小さく、同じノード数でも遭遇回数が多いためである．Amorphousは、ノード数の増加にともない、精度が良くなることが予想される．実際に図9(b)に示すように、自由空間では精度が向上する．しかし、図9(a)に示すように、多くの領域

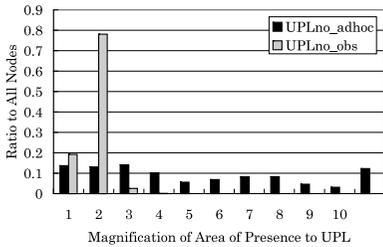
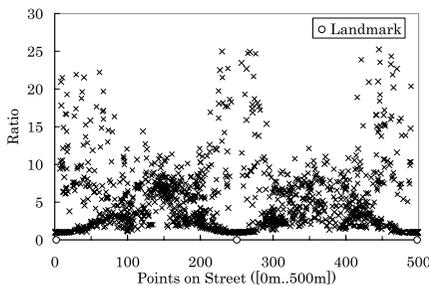
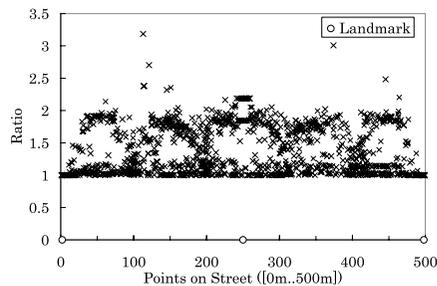


図7 悪化率の分布

Fig. 7 Distribution of magnification.



(a) UPL_{no_adhoc} / UPL



(b) UPL_{no_obs} / UPL

図8 500m長の直線道路上での悪化率

Fig. 8 Comparison of magnification on the street with median strip.

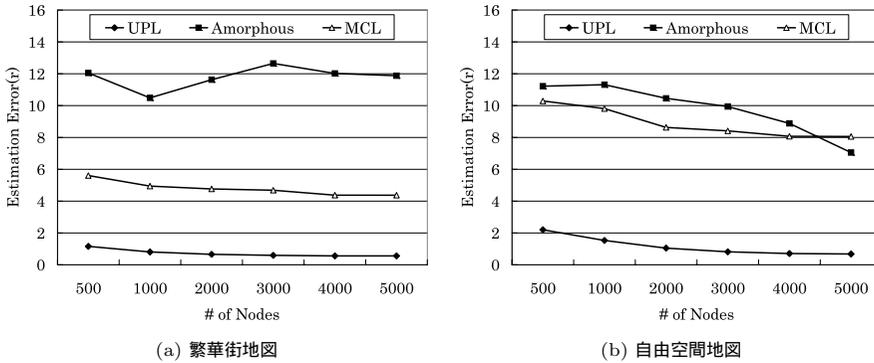


図 9 位置推定の平均誤差
Fig. 9 Estimated position errors.

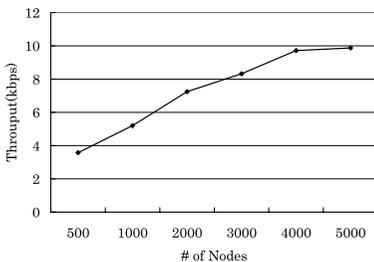


図 10 必要帯域幅
Fig. 10 Throughput.

が障害物によって制限され、ネットワークの形状に偏りが生じる繁華街においては、ノード数が増加しても精度は向上せず、Hello メッセージ伝播時のホップ数が制限されている MCL や UPL と比べても精度が悪い。また、MCL では基準ノードの存在領域の情報を 2 ホップで伝播させているため、ノード数の増加にともない、精度が向上する。しかし UPL と同程度の精度を実現するためには基準ノード数を増加する必要があると考えられる。一方、UPL はノード数が 2,000 以上で誤差がたかだか $0.7r$ 、すなわち 7m であり、既存手法に比べて高い精度を達成している。以上より、UPL は都市部におけるナビゲーション、付近の店情報の取得、児童の行動追跡といったサービスに対し十分な精度の位置情報を提供できると考えられる。

4.6 通信量

ここではノード数が UPL の通信量に与える影響を評価した。実験は繁華街地図を用いて行い、パラメータ値は表 1 の値とする。実験結果を図 10 に示す。図 10 より、ノード数が増加するほど、必要帯域幅が増加することが分かる。しかし、ノード数の増加にともない、存在領域が小さくなり、Hello メッセージ 1 つあたりのデータサイズは小さくなる。ノード数が 5,000 の場合でも必要帯域幅は 10 kbps 程度であることから、UPL

は ZigBee などでも十分実装可能であるといえる。

5. 考察

UPL は画像処理ライブラリで使用されるような複雑な計算を必要とせず、リスト検索のようなシンプルな計算の繰返しのみが要求されるため、処理能力の低いデバイスでも十分動作可能である。ここでは、UPL を実装する際に要するメモリ使用量および通信量に焦点を当てて議論する。

5.1 メモリ使用量

点の集合により領域を表現する MCL では、データサイズは点の個数に比例する。また、4 つの制御点で構成されるベジエ曲線により領域を表現する Sextant では、データサイズは制御点の個数に比例する。点の位置座標は 2 byte で表現できるため、両手法とも必要とするメモリはバイトオーダーである。

一方、UPL では、各ノードは自身の存在領域、障害物地図および遭遇ノードの存在領域の保持と存在領域の計算にメモリを要する。ここで、4 章での実験で用いたパラメータ値を用いて具体値を計算する。対象領域を $500\text{m} \times 500\text{m}$ 、グリッドの大きさを $2\text{m} \times 2\text{m}$ とすると対象領域全体は 250×250 個のグリッドを持つ。対象領域の各グリッドが障害物や存在領域であるか否かは 1 bit で表現できるため、存在領域や障害物地図のデータサイズはそれぞれ 8 kbyte である。各移動ノードは Hello メッセージを受信すると即座に UPL アルゴリズムを実行するため、1 度に記憶すべき受信存在領域はたかだか 1 である。よって、自身の存在領域、障害物地図および隣接ノードの存在領域の保持に要するメモリは 24 kbyte である。また、APC アルゴリズムで存在領域の拡大計算を行う際に、自由空間内の各グリッドに対し元の存在領域からの最短距離を記憶する必要がある。 $v_{max} = 2\text{m/s}$ 、 $r_{max} = 10\text{m}$ 、

$\Delta t_{max} = 2$ 秒の場合、拡大距離はたかだか 14m であるため、最短距離は 1 byte で表すことができる。したがって、APC アルゴリズムを実行する際に必要となるメモリは 62.5 kbyte である。以上より、各ノードが必要とするメモリは約 90 kbyte である。MCL や Sextant と比較すると UPL のメモリ使用量は大きい、メガバイトのオーダーでメモリを持つ最近の携帯端末にとって十分現実的な数値であるといえる。

5.2 通信量

ノード i が時刻 t に送信した Hello メッセージには、ノード i が最後に位置推定を行った時刻 t_i からの経過時間 Δt_i と時刻 t_i におけるノード i の存在領域 $R_i^{t_i}$ が含まれる。先ほどと同様、4 章での実験で用いたパラメータ値を用いて具体値を計算する。経過時間は 1 byte で十分表現可能である。また、存在領域の面積平均値は実験結果より約 200 m² であり、これは 2 m × 2 m のグリッド 50 個分に相当する。グリッドを 2 次元配列と見なした場合、各グリッドのインデックスは x 方向と y 方向それぞれ 1 byte で表現可能であるため、存在領域を表現する際に要するデータサイズは平均で 100 byte である。マンハッタンでの実験結果では、1 秒あたり受信する Hello メッセージ数の平均は 6 であるため、1 秒間に受信する Hello メッセージの合計サイズは平均 606 byte であり、4.85 kbps に相当する。また、障害物地図は 100 m × 100 m などに分割した情報のみを送信すれば、データサイズは 2.5 kbit となり、通信量を小さくすることが可能である。このため、遭遇ノードの 1 つが基準ノードであり、障害物地図が含まれていた場合でも必要な帯域幅は 7.35 kbps であり、十分実現可能な値といえる。

6. まとめ

本論文では、都市部における移動端末のための位置推定手法 UPL を提案した。都市部では、建物などの障害物による無線ネットワークの分断やノードの移動により、基準ノードからの位置情報を頻繁に得ることができない。このため、UPL では、基準ノードからの位置情報に加え、遭遇ノードから受信できる位置情報を利用する。また、障害物情報を利用し、ノードの移動可能領域を正確に求めることで、さらなる精度向上を図っている。今後は、小型の携帯端末でも動作することを示すため MOTE への実装を行う予定である。

参考文献

1) Hu, L. and Evans, D.: Localization for Mobile Sensor Networks, *Proc. 10th Int. Conf. on*

Mobile Computing and Networking (MobiCom 2004), pp.45–57 (2004).

- 2) Savvides, A., Han, C.-C. and Strivastava, M.B.: Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors, *Proc. 7th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, pp.166–179 (2001).
- 3) Nagpal, R., Shrobe, H. and Bachrach, J.: Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network, *Proc. 2nd Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2003)*, pp.333–348 (2003).
- 4) Guha, S., Murty, R. and Sirer, E.G.: Sextant: A Unified Node and Event Localization Framework Using Non-Convex Constraints, *Proc. 6th Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2005)*, pp.205–216 (2005).
- 5) MobiREAL: MobiREAL web page (online). available from <http://www.mobireal.net>
- 6) Konishi, K., Maeda, K., Sato, K., Yamasaki, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: MobiREAL Simulator – Evaluating MANET Applications in Real Environments, *Proc. 13th IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2005)*, pp.499–502 (2005).
- 7) Maeda, K., Sato, K., Konishi, K., Yamasaki, A., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Getting Urban Pedestrian Flow from Simple Observation: Realistic Mobility Generation in Wireless Network Simulation, *Proc. 8th ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2005)*, pp.151–158 (2005).
- 8) Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC)*, Vol.2, No.5, pp.485–502 (2002).
- 9) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.-C. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proc. 4th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 1998)*, pp.85–97 (1998).

(平成 19 年 3 月 22 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)

推薦文

移動無線端末の位置情報を基準点から推定する方式として、新たに移動無線端末間の情報交換、および障害物情報によって推定領域を狭めることで、少ない基準点から高精度に位置を推定できるアルゴリズムを提案している。従来のホップ数などから推定するアルゴリズムなどと比べても、非常に精度が良く、他の移動無線端末の存在が仮定できる都市部での位置推定方式として画期的な方法といえる。

(マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
プログラム委員長 佐藤文明)



藤井 彩恵 (学生会員)

平成 15 年大阪大学基礎工学部情報科学科入学。平成 18 年同大学飛び級中退後、同大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程進学。アドホックネットワークに関する研究に従事。



内山 彰 (学生会員)

平成 17 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程進学。ネットワークセキュリティやアドホックネットワークの

研究に従事。



前田久美子 (学生会員)

平成 18 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程進学。アドホックネットワークに関する研究に従事。



梅津 高朗 (正会員)

平成 13 年大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理系専攻博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程進学。平成 14 年同大学院博士後期課程退学後、同大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同大学院情報科学研究科助教。博士 (情報科学)。アドホックネットワーク用ミドルウェアや開発環境の研究に従事。



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 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。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。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。平成 19 年 10 月より、独立行政法人科学技術振興機構, CREST, 研究代表者。博士 (工学)。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員, IEEE Senior Member, 本会フェロー。