

推薦論文

## アドホック無線通信を用いた位置推定法の 現実環境を想定した性能評価

内山 彰<sup>†1</sup> 藤井 彩恵<sup>†1</sup> 梅津 高朗<sup>†1</sup>  
山口 弘純<sup>†1</sup> 東野 輝夫<sup>†1</sup>

我々はこれまでに都市環境における無線端末向けの高精度な位置推定法 UPL を提案している。本稿では、端末の消費電力を削減する一手法を示すとともに、現実環境を想定したシミュレーションによる性能評価を行うことで、現実環境における UPL の課題発見と解決を図る。UPL では端末間で位置推定に必要な情報をやりとりする必要があり、電力節約のためにその通信量をできるだけ削減することが求められる。このため、周辺端末の密度やそれらが保持するデータを推測し、推定精度の低下を抑えつつ自律的に通信量を削減できる方法を導入する。また、実環境での無線範囲の不安定性を考慮した無線範囲モデルを導入し、性能に与える影響を調べる。さらに、現実的な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 を用いて歩行者の信号待ちを再現することで、端末密度の分布が不均一な状況における性能を評価した。評価結果より、考案した手法によって推定精度の低下を抑えつつ通信量を削減可能であり、また、無線範囲が不安定な場合や端末密度の分布が不均一な環境でも、UPL は無線範囲と同程度の推定誤差を達成できることが確認できた。

### Evaluation of an Ad-hoc Based Positioning Technique in Realistic Environment

AKIRA UCHIYAMA,<sup>†1</sup> SAE FUJII,<sup>†1</sup> TAKA AKI UMEDU,<sup>†1</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>†1</sup> and TERUO HIGASHINO<sup>†1</sup>

In our previous work, we have proposed an ad-hoc localization technique for urban districts. In this paper, in order to see the performance of our localization technique in real environment, we have experimented our localization technique through simulation considering real environment. In our localization technique, information used for localization is exchanged among nodes through ad-hoc communication. However, it is required to reduce the amount of commu-

nication messages for power saving. For this purpose, we introduce a technique which reduces the amount of communication messages without increasing localization errors. In this technique, each node estimates node density and position errors of surrounding nodes, and it broadcasts its location information to neighbors only if its own information is likely to decrease the position errors of the neighbors. Moreover, we have evaluated our localization technique with the realistic radio propagation model and in the environment where node distribution is not uniform. From the results, we have confirmed that the proposed technique could reduce the amount of communication messages effectively without additional position errors. The results also show that our technique works well in realistic environment.

#### 1. はじめに

携帯電話や PDA、スマートフォンなどの無線通信機能を搭載した携帯端末が普及し、各端末の位置情報を利用したサービスやプロトコルが注目されている。これらのサービスやプロトコルを実現するためには、各端末の位置を特定する必要がある。このため、これまでに様々な位置推定アルゴリズムが提案されている。一般に位置推定アルゴリズムでは、正確な位置が分かっている端末（基準ノード）から送信される位置情報を基に、各端末の位置を決定する。基準ノードは、あらかじめ手動で位置を設定する、あるいは GPS が利用できる場合は GPS を使うといった方法で正確な位置を取得する。

位置推定アルゴリズムは、(i) 長距離通信可能な無線デバイスを搭載した基準ノードを少数配置する手法、および (ii) 短距離通信可能な無線デバイスを搭載した基準ノードを多数配置する手法の 2 種類に大別できる。しかし、都市部ではビルなどの障害物や地下街などが存在するため、長距離にわたる無線通信は電波が遮断されやすく、基準ノードからの位置情報を受信できない場合が多い。また、短距離無線デバイスを利用する場合でも、基準ノードの設置にはコストがかかるためできるだけ少ない基準ノード数で目標精度を得られることが望ましい。

そこで、基準ノードからの間接的な情報を利用する手法が多数提案されている。文献 1) を参考に、これらの手法は “collaborative multi-lateration”<sup>2)–6)</sup>、および “iterative multi-

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

本稿の内容は 2007 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウムにて報告され、ITS 研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

lateration<sup>7)-10)</sup>の2種類に分類できる。Collaborative multi-lateration では、基準ノードの位置情報をアドホックネットワークにより伝搬させ、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。Iterative multi-lateration では、ある端末の推定位置からその隣接端末の位置を推定する処理を繰り返し行う。しかし、都市部において歩行者は特定の目的地に向かって移動するケースが多く、静止することは少ない。また、ビルなどの障害物や地下街の存在により、つねに無線ネットワークが変化し頻りに分断される可能性がある。したがって、これらの手法は都市部での利用には適さない場合が多い。

このため我々は文献 11), 12) において、アドホック通信による都市部向けの位置推定手法 UPL (Urban Pedestrian Localization) を提案している。UPL では各端末が数  $m \sim$  十数  $m$  の通信が可能な ZigBee や Bluetooth などの短距離通信デバイスを保持しているものとする。UPL は各端末が自身の存在範囲 (area of presence) を保持し、端末どうしが遭遇した場合にのみ互いの存在範囲を交換し、存在範囲を更新することで位置推定を行う手法である。なお、端末  $i$  の存在範囲  $R_i$  とは、端末  $i$  がその中に存在していると推定される領域である。

文献 11), 12) では UPL の基本アルゴリズムについては述べられているものの、実装および実運用に向けた課題発見とその解決はなされていない。そこで本稿では、(i) Hello メッセージ送信頻度、(ii) 無線範囲の影響、(iii) 不均一な端末密度分布の3つに関するシミュレーションを行い、現実環境における UPL の性能を評価した。本稿では、提案手法の精度に与える影響が大きいと考えられる現実環境の要因として、端末密度および無線到達距離の2点に着目する。ほかにも電波の反射・回折などの詳細な無線伝搬や、湿度などの無線伝搬特性に影響を与える条件、および端末の処理速度といった要因が現実環境では存在するが、これらすべてをシミュレートすると計算時間が膨大になってしまう。しかし、端末密度および無線到達距離が提案手法の精度に与える影響に比べてこれらの影響は大きくないと思われるため、本稿では考慮していない。なお、文献 13) で報告されているように、既存の GPS 携帯電話を用いて取得可能な位置情報の精度は、高精度な場合で数  $m$  から数十  $m$  であり、本稿ではそれと同程度かより高精度である数  $m$  から十数  $m$  の位置推定精度を目標とする。

まず、携帯端末では電力制約のため、消費電力をできる限り低く抑えることが求められる。文献 11), 12) では、一定間隔で Hello メッセージを送信するものとしているが、つねにすべての存在範囲情報が位置推定の精度向上に貢献するとは限らない。したがって、不要な Hello メッセージ送信のために電力を消費しかねないという問題がある。そこで本稿では、通信量と精度のトレードオフを考慮した自律的な存在範囲情報の送信法を UPL に導入する。

以降、これを  $UPL_{reduce}$  と記述する。 $UPL_{reduce}$  では他端末の位置推定精度を向上させられるタイミングを自律的に推測することで、効果的な Hello メッセージ送信を実現する。

次に、実際の無線範囲は温度や湿度などの周辺環境によって変動し、一定ではない。そこで、無線の揺らぎが UPL の性能に与える影響を調べるため、文献 14) で提案されている Degree Of Irregularity (DOI) モデルと呼ばれる無線の揺らぎを考慮した無線範囲モデルを利用し、性能評価を行う。また、現実の都市環境では信号などの要因により端末密度分布が不均一となる。本稿では、不均一な端末密度分布が UPL の性能に与える影響を調べるため、歩行者信号によって生じる端末分布をシミュレーションで再現し、性能評価を行う。

以上のようなシミュレーションを行うため、現実的な人の行動を再現可能なネットワークシミュレータ MobiREAL<sup>15)-17)</sup> を用いた。評価結果より、 $UPL_{reduce}$  では推定精度の悪化を抑えつつ、Hello メッセージ数を大幅に削減できること、および無線の揺らぎが存在する環境や、端末密度の分布が不均一な環境でも UPL は無線範囲と同程度の推定誤差を達成できることが確認できた。

## 2. 都市環境向け位置推定法 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  $V_{max}$  で表す。時刻  $t$  において端末  $i$  が存在すると推定される範囲 (推定存在範囲、以下単に存在範囲と呼ぶ) を  $R_i^t$  とする。

基準ノード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  $i$  が基準ノードであれば、 $\Delta t_i$  は 0、 $R_i^{t_i}$  は基準ノードの正確な位置座標である。 $\Delta t_i$  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、基準ノードからの Hello メッセージには対象領域の障害物地図  $M$  が含まれる。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。

基準ノード以外の端末  $i$  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とおりである。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  $\Delta t_j$  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  $R_j^{t_j}$ , 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) および (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  $R_j^t \oplus r$  で表す。端末  $i$  は  $R_i^{t_i}$  と  $R_j^t \oplus r$  の両方に含まれるため、 $R_i^{t_i}$  と  $R_j^t \oplus r$  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))。このように UPL ではアドホックネットワークの管理を必要とせず、存在範囲の拡張および共通領域の計算のみが必要とされるため、きわめて低コストなオペレーションでの実現が可能である。

ここで、 $R_i^t$  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  $R_i^t$  は完全であるという。さらに、時刻  $t$  における端末  $i$  の 2 つの完全な存在範囲  $R_i^t$  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)。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。端末の推定位置を提示する必要があるサービスでは、存在範囲の中で何らかの基準により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。なお、UPL の詳細なアルゴリズムについては、文献 11), 12) を参照されたい。

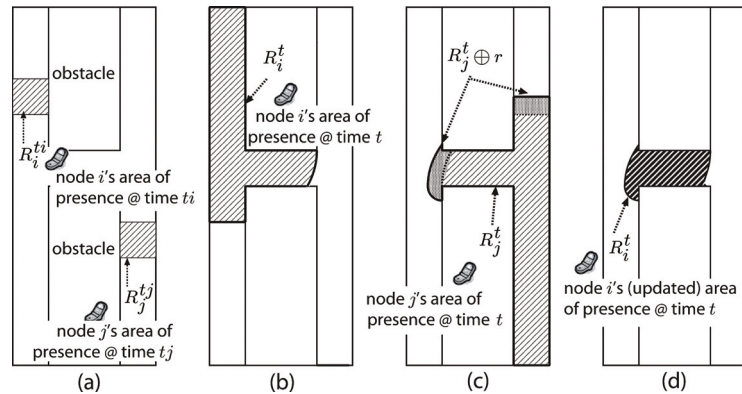


図 1 UPL による位置推定例  
Fig. 1 An Example of localization by UPL.

### 3. 自律的な Hello メッセージ削減法

端末密度が高い環境で、全端末が  $T$  秒ごとに Hello メッセージを送信すると、パケット衝突が発生する可能性が高い。また、通信量が多くなり消費電力が大きくなってしまふことが考えられる。したがって、Hello メッセージの送信回数をできるだけ少なくする必要がある。UPL<sub>reduce</sub> では Hello メッセージ数と位置推定精度のトレードオフを追求し、精度を保ちながら Hello メッセージ数を削減することを目標とする。

Hello メッセージは  $T$  秒ごとに送信されるが、存在範囲情報が他端末の存在範囲をどの程度狭小化できるかは、周辺端末密度や存在範囲の正確さによって異なる。一般には、なるべく多くの他端末の存在範囲を利用するほど精度は向上すると考えられるが、精度の向上に貢献しない場合もある。たとえば、図 2(a) のように基準ノード付近ではどの端末も基準ノードから直接情報を得られるため、それぞれの存在範囲は同様となり、他端末の存在範囲を利用することによる狭小化は難しい。また、図 2(b) のように他端末の存在範囲が自身の存在範囲を完全に含んでしまう場合は、他端末の存在範囲による狭小化はできない。これらの点に着目し、UPL<sub>reduce</sub> では他端末の精度向上に役立つ場合を自律的に判断して、Hello メッセージ送信を行うか否かを決定するアルゴリズムを導入する。

各端末は Hello メッセージを送信する際に、自身の存在範囲が他端末の存在範囲を狭小化できるかどうかを判断できないため、何らかの手段で狭小化の可能性を推測しなければならない。このため、我々は周辺端末密度、および存在範囲の面積 (すなわち位置推定精度) に着目し、(i) 過去一定期間に受信した他端末からの Hello メッセージ数が少ない場合、または (ii) 過去一定期間に受信した存在範囲面積の平均値と自身の存在範囲面積を比較して、

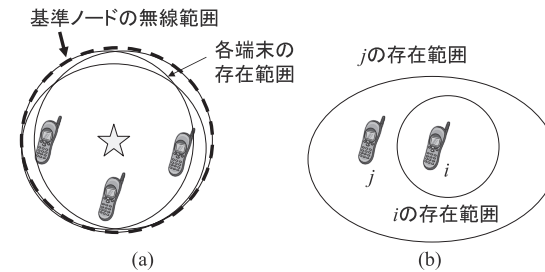


図 2 存在範囲の狭小化ができない場合の例  
Fig. 2 Examples of areas of presence with low effect.

自身の存在範囲面積が小さい場合に、Hello メッセージを送信する。

各端末は  $T$  秒ごとに Hello メッセージを送信するか否かの判定を行う。まず、周辺端末密度を見積もるため、過去  $T$  秒間に受信した Hello メッセージ数  $n$  を保持しておく。周辺端末密度が低い場合には、自身の存在範囲情報が他端末の存在範囲狭小化に役立つ可能性があるため、 $T_N$  を閾値として以下の式を満たす場合は、Hello メッセージを送信する。

$$n < T_N \quad (1)$$

式 (1) では、周辺端末密度が低い場合のみを考慮しているため、 $T_N$  は小さな値でよい。式 (1) を満たさない場合は、過去  $T$  秒間に受信した他端末の存在範囲面積の平均値  $\overline{|R_{recv}|}$  と、現在の自身の存在範囲面積  $|R_i|$  を求め、以下の式を満たす場合のみ、Hello メッセージを送信する。

$$|R_i| < \alpha \times \overline{|R_{recv}|} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  は 0 より大きい定数である。適切な値を  $\alpha$  に設定することで、存在範囲が他端末の精度向上に貢献する可能性が高い場合に Hello メッセージを送信するようにでき、高い精度を維持しつつ通信量を削減可能である。

## 4. 性能評価

### 4.1 評価環境

現実的な環境における提案手法の有効性を確認するため、これまでの性能評価で考慮されていないが提案手法の精度に与える影響が大きいと思われるいくつかの要因を考慮して性能評価を行った。シミュレーションには現実的な人の動きを再現可能なネットワークシミュレータ MobiREAL<sup>15)-17)</sup> を用いた。評価には図 3 に示すようなマンハッタン道路状のマップ

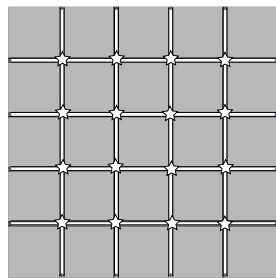


図 3 マンハッタン道路状のマップ  
Fig. 3 Manhattan map.

を用いた。マップの大きさは 500m 四方で、道路幅は 8m である。道路以外の領域は障害物とした。図 3 の星印は基準ノードを表しており、全交差点に合計 16 個配置した。端末の移動モデルは、“Random-Street-Decision (RSD)” モデルと “Signal” モデルの 2 種類を用いた。RSD モデルでは、各端末が交差点に到着するたびに、次の進行方向が後方以外からランダムに決定される。Signal モデルでは、各交差点に信号が設置されており、移動方向に応じてそれぞれの信号が一定周期で赤 (停止)、青 (横断可) に切り替わる。シミュレーションでは、60 秒ごとに赤、青が切り替わるものとした。不均一な端末密度分布を再現する実験では Signal モデルを利用し、それ以外の実験では RSD モデルを利用した。以降の実験では、特に明示しない限り表 1 に示すデフォルト値を用いている。

実験は、(i) Hello メッセージ削減法、(ii) 無線範囲の影響、(iii) 頻繁なネットワーク分断の影響、の 3 つについて行った。1 つ目の実験では、Hello メッセージの削減法の効果を確認するため、存在範囲面積、Hello メッセージ数を測定した。2 つ目の実験では、無線半径の変化が UPL の精度に及ぼす影響について実験を行った。また、現実環境で想定される無線範囲の変動にも、UPL は対応可能なことを確認するため、揺らぎを考慮した無線範囲モデル (DOI モデル) を適用し、完全性、および存在範囲面積を測定した。完全性とは、UPL アルゴリズム実行後のすべての存在範囲のうち、実際の端末の位置座標を内部に含む (すなわち完全な) 存在範囲の割合である。DOI モデルについては、続く 4.2 節で説明する。さらに最後の実験では、端末密度分布が不均一な環境における UPL の位置推定精度を確認するため、Signal モデルを用いて不均一な端末密度分布を再現したシミュレーションを行った。

### 4.2 揺らぎを考慮した無線範囲モデルの導入

無線は様々な環境によって影響を受けるため、実際の無線範囲は完全な円形とはならない。このような揺らぎのある無線範囲をシミュレーションで再現するため、文献 14) で提

表 1 シミュレーションデフォルト設定

Table 1 Default simulation settings.

グリッドサイズ ( $w$ )	2 (m)
無線半径 ( $r$ )	10 (m)
無線の揺らぎ度合い (DOI)	0
ノード数	2,000
移動速度	平均 1.5 (m/s), 分散 0.1 の正規分布
モビリティモデル	RSD モデル
Hello メッセージ送信間隔 ( $T$ )	2 (秒)
Hello メッセージ削減パラメータ ( $\alpha$ )	1000
Hello メッセージ削減閾値 ( $T_N$ )	1

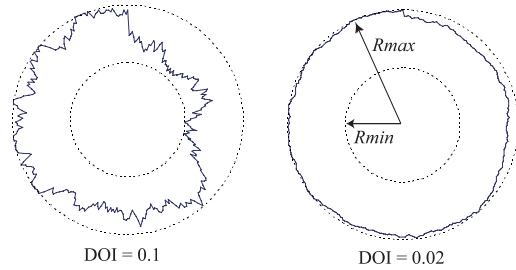


図4 Degree Of Irregularity モデル  
Fig. 4 Degree Of Irregularity Model.

案されている Degree Of Irregularity (DOI) モデルを導入する。図4にDOIモデルによって再現される無線範囲を示す。DOIモデルは、無線範囲を360度に分割し、それぞれに異なる通信距離を決定するという無線の揺らぎを考慮した無線範囲モデルである。角度 $\theta$  ( $0 \leq \theta < 360$ ) が与えられたとき、その方向への無線到達距離  $R[\theta]$  は、DOIを  $0 \leq DOI \leq 1$  の定数、 $C$ を無線範囲の最大変動幅、 $R_{init}$ を揺らぎを考慮しない場合の無線到達距離、 $\text{rand}[a, b]$ を  $[a, b]$ の範囲で一様な乱数を返す関数として以下の式で決定される。

$$R[0] = R_{init} + DOI \times C \times \text{rand}[-1.0, 1.0]$$

$$R[\theta] = R[\theta - 1] + DOI \times C \times \text{rand}[-1.0, 1.0]$$

ただし、 $R_{min} \leq R[\theta]$ 、 $R_{init} \leq R_{max}$ である。DOIモデルでは、DOIの値が大きくなるほど、無線の揺らぎが激しくなる。なお、 $\theta$ は小数点以下を切り捨てるものとした。

### 4.3 評価結果

#### 4.3.1 Helloメッセージの削減効果

閾値  $T_N$ を1に固定し、式(2)のパラメータ  $\alpha$ を変化させて、 $T$ が1, 2, 10秒の場合について、それぞれHelloメッセージ送信回数と存在範囲面積の平均値を測定した。結果を図5に示す。それぞれの  $T$ の値における評価結果より、適切な  $\alpha$  (おおよそ  $\alpha = 1.0$ ) を設定することで、 $T$ 秒ごとに必ずHelloメッセージを送信する場合 ( $\alpha = \infty$ ) と比べて、精度をほとんど悪化させずにHelloメッセージ数を削減できることが分かる。

$\alpha = \infty$ の場合は、全端末が  $T$ 秒ごとにHelloメッセージを必ず送信することになるため、削減手法を適用しない場合と同じである。Helloメッセージ数については、 $\alpha = \infty$ に対して  $\alpha = 1$ の場合は最低でも約60%、最高で約20%まで抑制されており、特に  $T$ が短い場合ほど大きな削減効果が得られる。この理由は、 $T$ が短いとトポロジ(隣接端末集合)が変化し

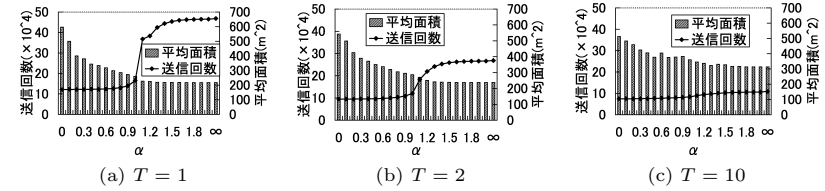


図5 存在範囲情報削減の影響  
Fig. 5 Effect of reduction of areas of presence information.

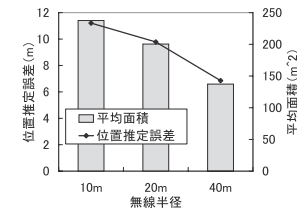


図6 無線半径の影響  
Fig. 6 Effect of wireless range.

なうちに何度もHelloメッセージを送信することになり、その結果、周辺端末の存在範囲の面積や位置が同様であるにもかかわらず、狭小化にあまり貢献しない存在範囲の送信を繰り返すためであると考えられる。UPL<sub>reduce</sub>では周辺端末の存在範囲面積に基づき、このような状況でのHelloメッセージ送信を抑制できるため、高い削減率が実現できる。

#### 4.3.2 無線範囲の影響

**無線半径の影響** UPLの精度は無線半径の大きさに依存する。無線半径を大きくすると、多くの端末から存在範囲情報を得られるため、精度が向上する。しかし一方で、通信可能な領域が広がることに起因する精度低下が発生する。この影響を調べるため、無線半径を10, 20, 40mと変化させてシミュレーションを行った。実験結果を図6に示す。無線半径が大きくなると、存在範囲面積・位置推定誤差共に精度向上が見られる。したがって、UPLが想定する都市部のような高密度な環境では、通信可能領域の拡大による精度低下よりも端末密度の増加による精度向上の影響が大きいことが分かる。

**無線範囲の揺らぎの影響** UPLの性能に対する無線範囲の揺らぎの影響を調べるため、DOIモデルを導入して完全性、面積を測定した。DOIモデルのパラメータは、 $R_{init}=10$ m、 $R_{min}=5$ m、 $R_{max}=10$ m、 $C=R_{max} - R_{min}=5$ に設定した。図7に評価結果を示す。評



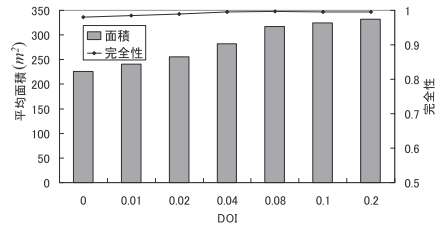


図 7 無線範囲の揺らぎの影響

Fig. 7 Effect of wireless range fluctuation.

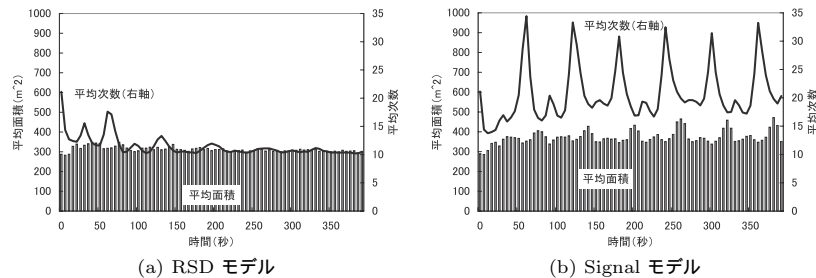


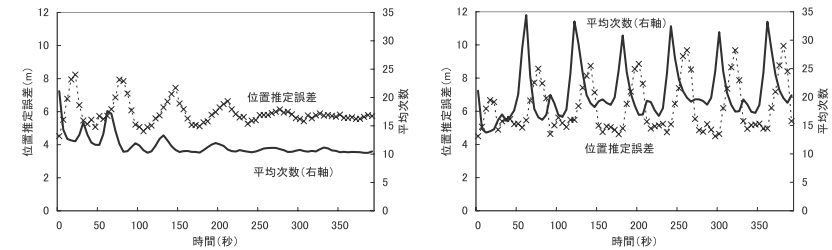
図 8 端末密度分布が不均一な環境での存在範囲面積

Fig. 8 Average size of areas of presence in uneven node distribution.

価結果より、無線の揺らぎが激しくなる（すなわち、DOI が大きくなる）ほど、存在範囲面積が大きくなっていることが分かる。UPL では無線到達距離の最大値  $r$  を  $R_{max}$  に設定しているので、無線の揺らぎが激しくなると、実際の無線到達距離は  $r$  より短い場合が多くなる。したがって、実際の無線範囲よりも余分に無線範囲を計算するため、存在範囲面積は大きくなる。しかし DOI が 0.2 と大きい場合でも無線の揺らぎがない場合と比較して  $100\text{ m}^2$  程度の悪化に抑えられており、十分実用に耐える範囲内の精度であるといえる。

#### 4.3.3 不均一な端末密度分布の影響

図 8 (a), (b) はそれぞれ RSD モデル, Signal モデルにおける存在範囲面積の時間変化と平均次数（隣接端末数）を表している。RSD モデルの場合はある程度時間が経過すると定常状態になっている。一方 Signal モデルでは、信号の周期に合わせて約 60 秒周期で平均次数が急激に増加し、その後急激に低下するという変動を繰り返している。また、交差点で停止する端末の周辺端末密度は極端に高くなるため、平均次数は全体的に RSD モデルと比べ



(a) RSD モデル

(b) Signal モデル

図 9 端末密度分布が不均一な環境での位置推定精度

Fig. 9 Positioning error in uneven node distribution.

て高い。存在範囲面積については、RSD モデルは定常状態で約  $300\text{ m}^2$  であるが、Signal モデルでは平均次数の周期に合わせて変動しており、最悪時には約  $400\text{ m}^2$  となっている。この現象は、以下のような原因によって発生していると考えられる。まず、信号が赤から青になった直後はすれ違う端末がほとんど存在しないため、狭小化に役立つ存在範囲情報が得られにくい。このため存在範囲は広がっていく。ある程度時間が経過すると進行方向側に存在する信号で停止していた複数の端末と 1 度に遭遇するため狭小化が頻繁に行われ、存在範囲は小さくなる。

また、図 9 (a), (b) は同様に位置推定誤差の時間変化を示している。RSD モデルの場合は、平均次数の定常状態に合わせて位置推定誤差も定常状態になっている。一方 Signal モデルの場合は、平均次数の周期に合わせて周期的に位置推定誤差も変動している。

実験結果より、Signal モデルのように端末密度分布が不均一かつ変動するような場合においても、UPL は最悪でも無線範囲と同程度の位置推定誤差が達成できていることが分かる。したがって、UPL は現実環境で想定される端末密度が不均一な環境においても、ナビゲーションなどに十分適用可能な精度であることが確認できた。

## 5. 関連研究

位置推定手法は大別して特殊な距離測定機器を用いるレンジベース手法と、端末間の通信機能のみを用いるレンジフリー手法に分類される。レンジベース手法では、電波強度 (RSSI) や端末間の角度 (AOA), 信号到達時間 (TOA) などにより端末間の距離を測定する。たとえば文献 18), 19) では、RSSI を用いた距離測定の精度を向上させる手法を提案している。また文献 20) は、AOA を用いた位置推定を IEEE802.11 上で実現する方法を提案して

いる．屋内向けの位置推定システムとしては，RADAR<sup>18)</sup> や Cricket<sup>21)</sup> などがあり，それらを利用したアプリケーションの 1 つに文献 22) で提案されている端末追跡システムがあげられる．一方，レンジフリー手法はレンジベース手法と異なり特殊なデバイスが不要なため，多くの携帯端末にすでに搭載されている無線通信機能のみを用いて，実現可能である．

文献 1) では，“hyperbolic tri-lateration”（三点測量），“triangulation”（三角測量），“maximum likelihood multi-lateration”（多点最尤推定）と呼ばれる位置推定アルゴリズムの分類が紹介されている．Multi-lateration は，*atomic*，*collaborative*，*iterative* の 3 つに分類される．Atomic multi-lateration は，直接通信可能な基準ノードが複数ある環境を想定し，位置を決定する際に 2 つ以上の基準ノードを利用する．Collaborative multi-lateration は，各端末が基準ノードの情報を交換し，位置を推定する．Iterative multi-lateration は，はじめに基準ノードからの情報を十分受信できる端末が位置推定を行う．そして，それらの端末を新たな基準ノードとして扱い，他端末が位置推定を行う処理を繰り返す．UPL は multi-lateration に属するレンジフリー手法であるので，以降では multi-lateration に属する手法について述べる．

まず，atomic multi-lateration に属する手法について説明する．Centroid<sup>23)</sup> は，対象領域全体において基準ノードから直接情報を受信できるような状況，すなわち，長距離無線通信デバイスを搭載した基準ノード，あるいは多数の基準ノードを想定している．各端末は位置情報を受信できた基準ノードすべての重心を自身の位置として推定する．APIT<sup>14)</sup> では，長距離無線通信可能な基準ノードを想定している．各端末は位置情報を受信した基準ノードを頂点とする複数の三角形を作り，各基準ノードからの信号強度を基に自身が各三角形の内部に存在するかどうかを調べることで，端末の存在範囲を絞り込む．また，MCL<sup>24)</sup> は各端末が自身の存在範囲を点集合として保持しており，端末の最大移動速度と経過時間を基に存在範囲を拡張する．そして，基準ノードからの情報を受信するたびに，その点集合を更新する．

次に，collaborative multi-lateration について述べる．APS (Ad-hoc Positioning System)<sup>2),3)</sup> は，各端末が直接情報を受信できない基準ノードまでの距離をホップ数によって推定する．文献 4) でも，同様にホップ数を利用した手法が提案されている．また，Amorphous<sup>5)</sup> では基準ノードからのホップ数を基に各端末が基準ノードとの距離を推定し，その推定距離にできる限り近くなるように位置を決定する．文献 6) で提案されている手法も，同様にホップ数により距離を推定するが，基準ノードは絶対座標を保持していない点で異なる．代わりに，基準ノードどうしが距離を推定し，相対的な位置座標を決定する仕組み

を導入している．文献 25) では，非凸領域にも適用可能なセンサネットワーク向けの位置推定手法を提案している．文献 26) では端末が存在しない空白地帯が存在するようなセンサネットワークを対象として，空白地帯を検出し，基準ノードとの距離を各端末が正しく推定可能な REP プロトコルを提案している．REP プロトコルでは空白地帯を検出するため，空白地帯の境界に存在する端末を検出するアルゴリズム<sup>27)</sup> を用いる．また，HCRL<sup>28)</sup> でも，基準ノードからの情報をフラッディングで伝搬させる方法をとる．HCRL では，複数の無線範囲を切り替えることで精度の向上を図る．一方，MDS-MAP<sup>29)</sup> は，サーバで端末の位置を推定する手法であり，収集した全端末間の最短経路情報を距離推定に用いる．MDS-MAP では，端末間の推定距離情報を基に“multidimensional scaling”と呼ばれる手法を利用して各端末の位置を決定する．

最後に，iterative multi-lateration では，他端末の位置推定結果を基に，また別の端末が位置推定を行う処理を繰り返す．文献 7) では，iterative multi-lateration の基本となる手法が提案されている．端末間の接続関係に基づく位置推定手法の理論的境界については，文献 8) で述べられている．Sweeps<sup>10)</sup> は，bi-lateration ordering を利用した，疎なネットワークでも位置推定が可能な手法である．Sextant<sup>9)</sup> は，端末間の接続関係だけでなくセンサが検知した環境情報（イベント）の位置も利用して，位置推定精度を向上させる工夫を行っている．また，Sextant では存在範囲をベジエ曲線の集合として表しており，少ない情報量で複雑な形状を表現可能としている．

都市部ではビルなどの障害物により電波が遮断されやすいため，長距離無線通信による基準ノード情報の伝搬が難しい．したがって，atomic multi-lateration に属する手法を都市部に適用するためには，多数の基準ノードを設置する必要があり，コストがかかる．また，collaborative multi-lateration に属する手法では，少ない基準ノードの情報をフラッディングなどによりノード間で交換してネットワーク全体に伝搬させる．しかし，都市における歩行者を想定した場合，端末の移動やビルなどの障害物によりネットワークが頻繁に分断されるため，マルチホップでの情報伝搬が困難である．一方，iterative multi-lateration に属する手法は他端末の位置推定結果を利用して他端末が位置推定を行う．UPL は iterative multi-lateration に属する手法であり，ネットワークが頻繁に分断される都市環境においても，他端末の位置推定結果を利用することで位置推定精度を高められる．iterative multi-lateration に属する手法のほとんどはセンサネットワークを対象としており，端末が移動する場合を考慮していない．端末の移動を考慮している手法として MCL<sup>24)</sup> と呼ばれる手法が存在するが，MCL は atomic multi-lateration に属する手法であるため，都市部には向

かない。UPLでは、基準ノードと直接通信できる機会が少ない環境を想定し、遭遇した他端末からの情報を利用する。都市環境では多数の人に遭遇すること、また、近年の携帯端末にはBluetoothなどの短距離通信デバイスが搭載されていることから、UPLは都市部におけるナビゲーションなどへの利用に適していると考えられる。我々はUPLを携帯型の小型センサ端末で動作させることを考慮し、このような端末の詳細な動きを容易に計算できるように、UPLを設計している。

## 6. おわりに

本稿では、我々が提案している都市環境向けの高精度な位置推定手法UPLが現実的環境においても高い精度を達成できることを示すため、現実環境を想定した性能評価を行った。Helloメッセージ送信頻度を自律的に調整する方法を導入したUPL<sub>reduce</sub>を提案し、シミュレーション実験を行ったところ、位置推定精度の悪化を抑えつつ、Helloメッセージの通信量を大幅に削減できることが分かった。また、無線の揺らぎを考慮した無線範囲モデルを用いたシミュレーション、および端末密度分布が不均一かつ変動する状況を再現したシミュレーションにより、現実環境において提案手法の精度に与える影響が大きいと思われるいくつかの要因を考慮した場合でも、UPLは無線範囲と同程度の位置推定誤差を達成できることを確認した。今後は実際にUPLが小型端末上で動作することを確認するため、PDAや携帯型小型センサ端末などにUPLを実装する予定である。

## 参考文献

- 1) Savvides, A., Han, C.-C. and Strivastava, M.B.: Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors, *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, pp.166–179 (2001).
- 2) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad hoc positioning system (APS), *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom 2001)*, pp.2926–2931 (2001).
- 3) Niculescu, D. and Nath, B.: DV-based positioning in ad hoc networks, *Journal of Telecommunication Systems*, Vol.22, No.1–4, pp.267–280 (2003).
- 4) Savarese, C. and Rabaey, J.: Robust positioning algorithms for distributed ad hoc wireless sensor networks, *Proc. USENIX Annual Technical Conference*, pp.317–328 (2002).
- 5) Nagpal, R., Shrobe, H. and Bachrach, J.: Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network, *Proc. Information Processing in Sensor Networks*, pp.333–348 (2003).

- 6) Wu, H., Wang, C. and Tzeng, N.-F.: Novel self-configurable positioning technique for multihop wireless networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.13, No.3, pp.609–621 (2005).
- 7) Albowicz, J., Chen, A. and Zhang, L.: Recursive position estimation in sensor networks, *Proc. 9th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2001)*, pp.35–41 (2001).
- 8) Bischoff, R. and Wattenhofer, R.: Analyzing connectivity-based multihop ad-hoc positioning, *Proc. 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2004)*, p.165 (2004).
- 9) Guha, S., Murty, R. and Sifer, E.G.: Sextant: A unified node and event localization framework using non-convex constraints, *Proc. 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2005)*, pp.205–216 (2005).
- 10) Goldenberg, D.K., Bihler, P., Cao, M., Fang, J., Anderson, B.D.O., Morse, A.S. and Yang, Y.R.: Localization in sparse networks using sweeps, *Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2006)*, pp.110–121 (2006).
- 11) Uchiyama, A., Fujii, S., Maeda, K., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Ad-hoc localization in urban district, *Proc. 26th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007) Mini-Symposium*, pp.2306–2310 (2007).
- 12) 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, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.12, pp.3977–3986 (2007).
- 13) 岡峰 正, 國頭吾郎, 高橋竜男, 田中 聡: GPS携帯電話による位置情報ログを用いた訪問施設抽出方法, *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2006) シンポジウム*, pp.273–276 (2006).
- 14) He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.: Range-free localization schemes for large scale sensor networks, *Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003)*, pp.81–95 (2003).
- 15) MobiREAL: realistic network simulator for MANET. available from <http://www.mobireal.net> (accessed 2008-07-09).
- 16) 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 International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2005)*, pp.151–158 (2005).
- 17) Konishi, K., Maeda, K., Sato, K., Yamasaki, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: MobiREAL simulator – evaluating MANET applications in real en-



- vironments, *Proc. 13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pp.499–502 (2005).
- 18) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *Proc. 19th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2000)*, pp.775–784 (2000).
- 19) Patwari, N. and Hero, A.O.: Using proximity and quantized RSS for sensor localization in wireless networks, *Proc. 2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2003)*, pp.20–29 (2003).
- 20) Niculescu, D. and Nath, B.: VOR base stations for indoor 802.11 positioning, *Proc. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2004)*, pp.58–69 (2004).
- 21) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket location-support system, *Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pp.32–43 (2000).
- 22) Smith, A., Balakrishnan, H., Goraczko, M. and Priyantha, N.: Tracking moving devices with the cricket location system, *Proc. 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2004)*, pp.190–202 (2004).
- 23) 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).
- 24) Hu, L. and Evans, D.: Localization for mobile sensor networks, *Proc. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2004)*, pp.45–57 (2004).
- 25) Wang, C. and Xiao, L.: Locating sensors in concave areas, *Proc. 25th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2006)*, pp.1–12 (2006).
- 26) Li, M. and Liu, Y.: Rendered path: range-free localization in anisotropic sensor networks with holes, *Proc. 13th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2007)*, pp.51–62 (2007).
- 27) Wang, Y., Gao, J. and Mitchell, J.S.B.: Boundary recognition in sensor networks by topological methods, *Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2006)*, pp.122–133 (2006).
- 28) Yang, S., Yi, J. and Cha, H.: HCRL: A hop-count-ratio based localization in wireless sensor networks, *Proc. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2007)*, pp.31–40 (2007).
- 29) Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y. and Fromherz, M.P.J.: Localization from mere connectivity, *Proc. 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Network-*

*ing and Computing (MobiHoc 2003)*, pp.201–212 (2003).

(平成 20 年 1 月 3 日受付)

(平成 20 年 7 月 1 日採録)

## 推 薦 文

本稿で、アドホック通信を使った都市向けの位置推定手法 UPL を提案している。

提案手法では、まず、他端末の存在範囲情報を考慮した送信頻度調整アルゴリズムを考案することにより、Hello パケット数の軽減を実現した。

また、存在範囲情報や障害物地図などの領域情報を階層化することにより、必要なデータサイズの削減を行った。

本稿ではこれらの手法を現実的な人の行動を再現可能なネットワークシミュレータ MobiREAL 上に実装することによって、本手法が精度の悪化を抑えつつ、Hello メッセージの通信量の大幅な削減を証明した。

本研究成果は、リソース制約が厳しい移動小型端末の位置補正技術への適用が期待でき、車両や携帯電話など様々な機器への適用により、安全・安心な交通環境を提供することが期待できる。

よって、本稿を推薦論文として推薦します。

(高度交通システム研究会主査 小花貞夫)



内山 彰 (正会員)

平成 20 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後期課程修了。現在、日本学術振興会特別研究員・博士(情報科学)。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。



藤井 彩恵 (学生会員)

平成 20 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。平成 20 年より日本学術振興会特別研究員。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。