

## 断続的に移動する無線端末群の位置推定

樋口雄大<sup>†1</sup> 藤井彩恵<sup>†1</sup>  
山口弘純<sup>†1,†2</sup> 東野輝夫<sup>†1,†2</sup>

本論文では、断続的に移動する無線端末群の位置を少ない測位回数で高精度に推定する分散協調型の位置推定手法を提案する。提案手法では、各端末が周辺端末との測距結果を用いてそれらの移動状態を推定し、位置誤差が比較的小さいと想定される静止中の端末の推定位置のみを位置基準として用いることで位置精度を向上させる。また、静止中の端末の測位頻度を下げることによって総測位回数の軽減を図る。シミュレーションによる性能評価により、移動状態の検出を行わず、すべての端末を一定頻度で測位した場合と比較して、測位精度を44%~91%改善できることを示した。また、比較手法と同等のトラッキング性能を実現するために必要な測位回数を最大77%軽減できることが確認された。

## Efficient Localization for Intermittently Moving Nodes

TAKAMASA HIGUCHI,<sup>†1</sup> SAE FUJII,<sup>†1</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>†1,†2</sup> and TERUO HIGASHINO<sup>†1,†2</sup>

In this paper, we propose a distributed cooperative algorithm to efficiently localize mobile wireless nodes with intermittent movements. We detect moving nodes based on the distance measurement from all the neighboring nodes, and use only static nodes as reference points to mitigate error propagation between nodes. In addition, we reduce the localization frequency of static nodes to decrease the total localization attempts. We demonstrated that our algorithm improves estimation accuracy by 44% – 91%, compared to the straightforward method which performs localization at constant time intervals and uses all the neighboring nodes as anchors. In addition, localization frequency was decreased by up to 77% to achieve the same accuracy as the compared method.

### 1. はじめに

近年、カーナビゲーションシステムや携帯電話を用いた歩行者向けナビゲーションサービスといった、位置情報を用いたサービスが急速に普及している。これらのサービスの多くは測位技術としてGPSを利用しているが、GPSは、建物などの障害物が多数存在する都市環境や屋内など、測位衛星からの信号を受信できない場所では測位を行えないという問題がある。このような環境下で移動端末の位置を高精度に検出するために、正確な位置が既知である固定端末(ランドマーク)を高密度に配置し、それらの端末と通信や測距を行うことで測位を行う方法が研究されている<sup>1)–6)</sup>。しかし、これらの手法では、多数のランドマークを配置・設定するための手間やコストが問題となる。このため、測位が完了した端末の推定位置を位置基準として利用することで測位に必要なランドマークの数を軽減する協調型位置推定(cooperative localization)と呼ばれる手法が研究されており、主にセンサネットワークなどの固定端末を対象とした手法が数多く提案されている<sup>7)–10)</sup>。協調型位置推定では、位置誤差が大きい端末を位置基準として参照した場合に、推定対象となる端末に対して位置誤差が伝播する。したがって、固定端末よりも推定位置の誤差が大きくなりがちな移動端末に対して適用する場合には、位置推定精度が悪化する可能性が高い。また、移動端末の位置を高精度に推定するためには各端末を高頻度で繰り返し測位する必要があるが、端末の消費電力や通信帯域の制約により、測位頻度の増加には限界がある。

既存の移動端末向け位置推定手法は、すべての端末が常時移動する環境を想定しているが、現実環境では、各端末は移動と静止を繰り返していることが多い。たとえば、美術館などにおいて、携帯端末を保持した来客が複数の展示場所を巡回するような場合、展示場所の周辺ではその多くが静止すると考えられる。また、スーパーマーケットにおいて、ショッピングカートに小型の通信端末を取り付けることで買い物客の動線管理を行っている事例がある<sup>11)</sup>、この場合も同様に、売り場周辺では多くの端末が静止すると想定される。したがって、ある時刻でみた場合、移動中と静止中の端末が混在しているのが自然である。

本論文では、各移動端末(ノード)が周辺ノードとの距離を測定するための機器を保持し、ランドマークが疎に配置された環境を想定する。このもとで、断続的に移動する無線端

<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

<sup>†2</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

末群の位置を、全体の測位回数を抑制しつつ、高精度に推定する分散協調型の位置推定手法を提案する。提案手法では、各ノードが周辺ノードとの測距結果を用いてそれらの移動状態を推定し、静止中と判定したノードの推定位置のみを位置基準として自己位置を推定することで、位置誤差が比較的大きいと想定される移動中のノードの位置誤差を排除する。推定位置が得られたノードは、前回測位時からの推定移動距離および経過時間をもとに推定移動速度を検出し、自身の移動状態を判定する。自身が移動ノードであると推定される場合には測位頻度を上げて精度向上を図り、静止していると推定される場合には測位頻度を下げることにより測位回数を軽減させる。なお、静止ノードが存在しない環境においても、位置誤差が比較的小さいと想定されるノードを位置基準とし、可能な限り精度の高い推定位置を求めることができる。

提案手法の性能を評価するため、シミュレーションによる評価実験を行った。ノードの移動状態の検出を行わず、全ノードが一定頻度で測位を行った場合と比較した結果、提案手法では、位置推定精度が44%~91%改善されることが分かった。また、提案手法では、同等のトラッキング性能を実現するために必要な測位回数を最大77%軽減できることが確認された。

## 2. 関連研究

協調型位置推定手法は、測距結果の処理方法によって、集中型と分散型に分類することができる。集中型手法では、測定によって得られたノード間の距離情報をサーバに集約し、サーバが全ノードの測位計算を行うことで、ネットワーク全体の俯瞰図を作成する<sup>7),12)</sup>。集中型手法は、距離情報の集約や位置推定結果の端末へのフィードバックにかかる通信のオーバーヘッドを考慮した場合、本論文で想定するような、各移動端末が自己位置をリアルタイムに検出する必要があるナビゲーションなどの用途には適さない。一方、分散型手法では、各ノードが周辺ノードとの測距値や位置情報を収集することで自己位置推定を行う。DV-hop<sup>13)</sup>は、ランドマークから送信されたパケットが経由したホップ数をもとに各ノードがランドマークとの距離を見積もり、多辺測量によって位置を推定する。同文献では、ノード間で測距を行い、各ノードからランドマークへの最短経路の長さをランドマークとの距離の近似値として用いることで高精度な推定を実現する、DV-distanceと呼ばれる手法も提案されている。DOLPHIN<sup>10)</sup>は、ランドマークおよび位置既知のノード(アンカ)が電波信号と超音波信号を同時に送信し、周辺ノードがそれら2つの信号の到達時間差を計測することでアンカとの距離を測定する。3つ以上のアンカとの測距値が得られたノードは、三

辺測量により自身の位置を推定し、それ以降はアンカとして動作する。これを繰り返すことにより、各ノードの位置が逐次的に求まる。文献8)では、はじめにDV-hopと同様のアルゴリズムによってノードの大まかな位置を求めて初期解とし、その後、各ノードが周辺ノードの位置情報と測距値を用いて多辺測量を繰り返すことで推定位置の精度を高める。このとき、各ノードの位置情報に対して信頼度を定義し、多辺測量の際に重みとして用いることで、精度の向上を図る。また、文献9)では、高い精度で位置推定が可能と思われるノードから段階的に測位を行うことで、誤差伝播の影響を軽減させる。TRADE<sup>11)</sup>は、近接するノード間におけるメッセージ交換により周辺ノードの現在および過去一定期間の推定位置情報を取得し、これらを利用して移動端末の位置を低コストに推定する。DOLPHINや文献8),9)といった手法を用いて移動端末の位置をリアルタイムに推定するためには、これらの位置推定アルゴリズムを繰り返し適用することでノードの位置情報を高頻度で更新する必要があるが、端末資源の観点から、測位頻度の増加には限界がある。TRADEでも同様に、各ノードが高頻度で測位を実行する必要があるほか、屋内など通信が不安定な環境下では、信号到達距離の変動などの要因により誤差が大きくなるといった課題がある。

一方、センサ端末を環境内に高密度に配置することで、通信機能を持たない移動体の位置を検出する技術も研究されており<sup>2)-6)</sup>、電力や通信帯域といった端末資源の消費量を抑えるために、起動するセンサの数を動的に制御する手法が提案されている。文献2)は、与えられたコストの範囲内で、得られる情報の量が最大となるように、駆動するセンサを決定する。文献3)は、対象物の位置を予測し、対象物を検知できると想定されるセンサのみを駆動する。また、文献4)では、位置トラッキングのための動的クラスタリング手法を提案している。これらの既存手法と提案手法は、位置推定に利用するノード(センサ)を選択することで省電力化を図るという点で共通する部分もあるが、これらの既存手法は測位のために駆動するセンサの数を抑えるのに対し、提案手法は測位の実行回数自体を軽減する点が異なる。また、これらの既存手法は対象物をセンサによって検知することで対象物の位置を検出するのに対し、提案手法では通信機能を備えた移動端末を測位の対象とすることから、想定する環境も異なる。

これらの既存の移動端末向け位置推定手法や移動体の検出手法は、推定対象が移動し続けている環境を想定している。したがって、提案手法のように測位プロセスの中で得られる距離情報をもとに移動状態の検出を行い、その結果を誤差や測位回数の軽減に活用するアイデアはこれまでに提案されておらず、新規性が高い。またシミュレーション実験により、測位効率が大幅に改善されることを示し、その有効性も検証している。

### 3. 想定環境

#### 3.1 ノードの構成とモビリティ

多辺測量を用いてノードの2次元位置を推定するためには、少なくとも3つ以上の基準位置と、それらへの距離情報が必要となる。提案手法では、あらかじめ正確な位置情報を設定した固定端末(ランドマーク)が3つ以上配置された領域内において、移動端末(ノード)が、周辺ノードとの測距結果をもとに自己位置をリアルタイムに推定する。なお、ノードの最大移動速度  $V_{max}$  は既知とする。

各ノードは周辺ノードとの測距機能と通信機能を備える。本論文では、以降の議論の簡単のため、各ノードは電波と超音波の送受信モジュールを装備しており、周辺ノードやランドマークとの距離を電波と超音波の到達時間差(TDoA)から測定できるものとするが、提案手法は測距方法とは独立であるため、電波の到達遅延時間(ToA)を用いる方法など、屋内環境における測距誤差がおよそ1(m)以内に抑えられ、かつ、測距誤差をおおまかに予測することができれば、他の測距手法も適用可能である。超音波信号は特有の指向性を持つが、本手法では、文献10)のように複数の超音波モジュールを放射状に配置することで、全方位に信号を送受信できると仮定する。

#### 3.2 距離の測定

TDoA (Time Difference of Arrival) 方式は、超音波が電波に比べて伝播速度が遅いことを利用し、電波と超音波の到達時間差から距離を測定する方法であり、Cricket<sup>1)</sup> や DOLPHIN<sup>10)</sup> など、多くの位置推定手法で用いられている。TDoAに基づき2ノード間の距離を測定する場合、はじめに、送信ノードが電波信号と超音波パルスを同時に発信する。測距に用いるこれらの信号を測距信号と呼ぶ。受信ノードでは、電波と超音波の伝播速度の違いにより、超音波パルスが電波信号よりも遅れて観測される。電波と超音波のTDoAを  $t_d$  とすると、送受信ノード間の見通し距離  $d$  は、式(1)により与えられる<sup>14)</sup>。

$$d = \frac{t_d}{\frac{1}{speed_{RF}} - \frac{1}{speed_{US}}} \quad (1)$$

$speed_{RF}$  と  $speed_{US}$  は、それぞれ、電波と超音波の伝播速度である。送信ノードが発信した測距信号を複数のノードで受信すれば、1回の信号送信で、送信ノードと複数の受信ノードとの距離を測定することが可能である。TDoAによる測距精度は、到達時間差の測定精度、温度や湿度による信号伝播速度の変化などに依存するが、ノード間の見通し(LOS:

Line of Sight) が確保されていれば、おおむね数cm~数十cm程度の精度が得られる。

### 4. 提案手法

#### 4.1 提案手法の概要

測位の際に位置の基準となる端末をアンカと呼ぶ。各ノードは3つ以上のアンカの位置情報および測距結果を用いて自己位置を推定する。全ノードの位置が未知である初期状態においては、アンカとして利用可能な端末はランドマークのみとする。また、各ノードは、自身の推定位置  $(x_i, y_i)$ 、推定移動速度  $v_i$ 、および推定移動状態(移動または静止)を保持し、推定移動状態が移動であるノードは、4.4節で定義する測位間隔に基づき、繰り返し測位を実行する。ランドマークが保持する位置は正確であり、移動速度はつねに0とする。

あるノード  $A_0$  が測位を行う場合、 $A_0$  は、はじめに周辺ノードに対して測距信号を送信する。測距信号を受信した周辺ノード  $A_i$  は、ランドマークであるか、または測位によってすでに推定位置が得られており、かつ、自身の移動状態を静止と判定している場合に限りアンカの候補となり、自身の位置情報ならびに  $A_0$  との測距情報を  $A_0$  へ送信する(図1)。 $A_0$  は、測距結果が得られた周辺ノードの位置情報および距離情報をもとに自己位置を推定する。

ただし、静止していたノードが移動を始め、自身の移動を検知する前に測位ノードから測距信号を受信した場合、実際には移動しているにもかかわらず、測位ノードへ測距結果を返してしまう。移動ノードは前回の測位からの時間経過に依存して大きな位置誤差を持つと考えられるため、このようなノードをアンカとして利用すると、その位置誤差が測位ノードへ伝播し、位置推定精度が悪化する可能性が高い。移動ノードからの誤差の伝播を防ぐため、提案手法では、測位ノード  $A_0$  が、測距信号の応答として得られた測距結果をもとにアンカ

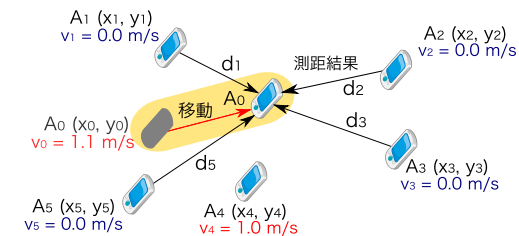


図1 提案手法の概念図

Fig.1 Concept of the proposed algorithm.

候補の移動状態を再検証する．そして，移動していると推定されたノードを除外した残りのノードをアンカとし，最小二乗法によって各アンカとの距離が測距値になるべく近くなるような推定位置を求める．また，測位ノードは，移動中と判定したアンカ候補に対して移動通知メッセージを送信し，それを受信したアンカ候補はただちに測位を実行する．移動ノードの検出方法については4.2節，最小二乗法による推定位置の導出については4.3節で述べる．最小二乗法によって新しい推定位置が得られた場合， $A_0$  は前回測位を行ってからの推定移動距離を算出し，その値と経過時間とを用いて推定移動速度  $v_0$  を更新する．なお，移動距離が十分に小さい場合は  $v_0 = 0$  と見なし， $A_0$  は自身の移動状態を静止と判定する．測位の際に3つ以上のアンカを参照できなかった場合には，定められた時間待機した後，再測位を行う．

#### 4.2 移動ノードの検出

周辺ノード  $A_i$  との測距値を  $d_i$ ， $A_i$  の位置情報および測距値  $d_i$  に対して想定される誤差の和を  $\epsilon_i$  とすると，測位ノード  $A_0$  の位置は， $A_i$  を中心とする半径  $[d_i - \epsilon_i, d_i + \epsilon_i]$  の円環領域内と推定される． $\epsilon_i$  は， $A_i$  の推定位置誤差  $\sigma_{p_i}$  と推定測距誤差  $\sigma_{r_i}$  の和として式(2)により与える．

$$\epsilon_i = \sigma_{p_i} + \sigma_{r_i} \quad (2)$$

位置誤差  $\sigma_{p_i}$  は， $A_i$  が測位を行う際に  $A_i$  自身が推定する．この値は，測距信号受信時に，測距結果とともに測位ノード  $A_0$  へ送信される． $\sigma_{p_i}$  の推定方法については後述する．また，測距を行うノード間で見通し通信が可能な場合，測距誤差は正規分布に従うことが知られている<sup>14)</sup>．測距誤差はノード間の距離が長いほど大きくなると想定されることから，本手法では，測距誤差の推定値  $\sigma_{r_i}$  を式(3)により与える．

$$\sigma_{r_i} = \sigma_0 d_i \quad (3)$$

ここで， $\sigma_0$  は，ノード間の距離が1(m)の場合の測距誤差の標準偏差であり，事前の実測などにより既知とする．

$\sigma_{p_i}$  は， $A_i$  が前回測位を行った時点の推定値であるため， $A_i$  が前回測位を実行した位置から移動した場合，位置誤差はさらに大きくなると考えられる．このため， $A_i$  が移動ノードである場合には，測位ノード  $A_0$  の実際の位置が  $A_i$  の推定位置を中心とする半径  $[d_i - \epsilon_i, d_i + \epsilon_i]$  の円環領域外となる可能性が高い．これに対し，本手法では，すべてのアンカ候補との測距結果を用いて測位ノードの大まかな位置(初期解)を推定し，得られた解が前述の円環領域に含まれているかを判定することで， $A_0$  自身が各アンカ候補の移動状態を再検証する．以上のプロセスの具体的な手順を以下で述べる．

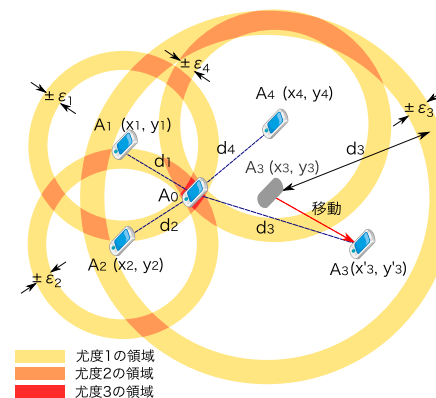


図2 初期解の尤度分布

Fig. 2 Likelihood distribution of candidate points for initial estimation.

アンカ候補の中で，前回測位時から移動していないノードの割合が十分に高いと仮定すると，測位ノード  $A_0$  の付近において，最も多くの円環が重なる．この重なり領域内の点は，最も多くのアンカ候補に対して測距結果との不整合を生じない位置といえる．このような領域内の点を以下の手順により求め， $A_0$  の推定位置の初期解  $\theta_0$  とする．

- (1) 各アンカ候補  $A_i$  の推定位置  $(x_i, y_i)$  を中心とする半径  $[d_i - \epsilon_i, d_i + \epsilon_i]$  の円環領域に，初期解の候補点  $\theta^{(u)}$  ( $u = 1, 2, \dots$ ) を一様に生成する．ただし，アンカ候補の中にランドマークが含まれる場合には，ランドマークとの測距結果を優先的に位置推定結果に反映させるため，ランドマークの円環領域にのみ候補点を生成する．このとき， $\epsilon_i$  に対して下限値  $\epsilon_{min}$  を定め，推定誤差が小さい静止ノードが移動ノードとして誤検出されることを防ぐ．
- (2) ノードの最大移動速度を  $V_{max}$ ， $A_0$  の前回の測位時からの経過時間を  $\Delta T$  とすると，その間の最大移動距離は  $V_{max} \Delta T$  となる．そこで， $A_0$  の前回の測位時の推定位置との距離が  $V_{max} \Delta T$  よりも大きい候補点は除外する．
- (3)  $\theta^{(u)}$  と各アンカ候補の推定位置  $(x_i, y_i)$  との距離  $d_i^{(u)}$  を求め，測距値  $d_i$ ，誤差の推定値  $\epsilon_i$  に対して  $|d_i^{(u)} - d_i| \leq \epsilon_i$  となるノードの数を，その候補点の尤度とする．候補点の尤度の分布の例を図2に示す．
- (4) 尤度最大の候補点の中で，それらの重心に最も近い点  $(x^{(0)}, y^{(0)})$  を初期解とする．測位ノードは，初期解  $\theta_0$  から各アンカ候補の位置  $(x_i, y_i)$  への距離  $\hat{d}_i$  を求め， $|\hat{d}_i - d_i| >$

$\epsilon_i$  となるノードを移動ノードとして検出する．そして，移動中と判定されたノードを除外した残りのノードをアンカとして選択する．図 2 の例では，尤度最大の領域が  $A_3$  を中心とする円環領域外に存在するため， $A_3$  が移動ノードとして検出される．アンカ選択の結果，3 つ以上アンカを参照できた場合は，最小二乗法を用いて各アンカとの距離が測距値になるべく近くなる点を探索することで，推定位置の精度を高める．このとき，式 (4) により尤度最大の候補点のばらつきを評価し，測位対象ノード  $A_0$  の推定位置誤差  $\sigma_{p_0}$  と定義する．なお，ランドマークは  $\sigma_{p_i} = 0$  とする．

$$\sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \{(x^{(u)} - \bar{x})^2 + (y^{(u)} - \bar{y})^2\}}{N - 1}} \quad (4)$$

$N$  は尤度最大の候補点の数， $(\bar{x}, \bar{y})$  はそれらの重心を表す．

一方，3 つ以上のアンカを参照できなかった場合は測位失敗とする．また，手順 (4) において，尤度最大の候補点が互いに離れた複数の領域に分かれてしまった場合は，ノードの推定位置を一意に決定することができない．この場合， $\sigma_{p_i}$  の値が大きくなると想定されるため， $\sigma_{p_i}$  があらかじめ定められた許容値  $\sigma_{p_{max}}$  よりも大きくなる場合も測位失敗と見なす．

したがって，3 つ以上のアンカを参照でき，かつ， $\sigma_{p_i} \leq \sigma_{p_{max}}$  が成り立つ場合に限り測位は成功であるとし，測位ノードは自身の推定位置および推定速度を更新する．一方，測位に失敗した場合には，定められた時間待機した後，測位を再実行する．

ノードの移動性が高く，フィールド内における静止ノードの割合が低いと想定される場合には，あらかじめ提案手法のパラメータ  $\epsilon_{min}$  に大きな値を設定することで移動検出の条件を緩和する．また，尤度最大の領域内の初期解の候補点の密度は，アンカ候補の数  $M$  が多いほど高くなると考えられるため，各円環領域に対する候補点の生成密度  $\delta$  は，式 (5) のように， $M$  が大きいほど低くする． $\delta_{max}$  と  $\delta_{min}$  は生成密度の最大値と最小値であり，パラメータとして与える．また， $M_{max}$  は想定されるノード密度に応じて決定する ( $M_{max} > 3$ )．なお，ランドマークとの測距結果が得られた場合には，手順 (1) においてランドマークの周辺のみ候補点が生成されるため，候補点の生成密度  $\delta$  は測距結果が得られたランドマークの数  $M_{LM}$  に基づき決定する．

$$\delta = \begin{cases} \delta_{max} - \frac{M - 1}{M_{max} - 1}(\delta_{max} - \delta_{min}) & (3 \leq M \leq M_{max}) \\ \delta_{min} & (M > M_{max}) \\ \delta_{max} - \frac{M_{LM} - 1}{M_{max} - 1}(\delta_{max} - \delta_{min}) & (\text{ランドマークの場合}) \end{cases} \quad (5)$$

### 4.3 位置推定アルゴリズム

本節では，最小二乗法による推定位置の探索方法について述べる．ここでは，推定位置の初期解を  $\theta_0 = (x^{(0)}, y^{(0)})$ ，アンカの推定位置を  $\phi_k = (X_k, Y_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, M'$ ) とする． $M'$  はアンカとして選択されたノードの数であり，アンカ候補の数  $M$  に対して  $M' \leq M$  が成り立つ．はじめに，式 (6) に  $\theta = \theta_0$  を代入することにより，初期解  $\theta_0$  と各アンカの推定位置の距離  $D(\theta_0)$  を求める．

$$D(\theta) = \begin{pmatrix} D_1(x, y) \\ \dots \\ D_{M'}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x - X_{M'})^2 + (y - Y_{M'})^2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

各アンカとの測距値を  $d = (d_1, d_2, \dots, d_{M'})^T$  とすると，測位対象ノードの推定位置  $\theta_{opt}$  は，式 (7) のコスト関数を最小化することで得られる．ここで， $W$  は重み行列とする．

$$C(\theta) = (d - D(\theta))^T W (d - D(\theta)) \quad (7)$$

現在の解  $\theta_i$  に対して， $\|\theta_{i+1} - \theta_i\|$  があらかじめ定めた閾値よりも小さくなるか，反復回数が上限に達するまで式 (8) を繰り返し適用することで  $\theta_{opt}$  が得られる．

$$\theta_{i+1} = \theta_i + (J^T W J)^{-1} J^T W (d - D(\theta_i)) \quad (8)$$

$J$  は  $D(\theta)$  のヤコビ行列であり，式 (9) で与えられる．

$$J = \begin{pmatrix} \frac{x - X_1}{\sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}} & \frac{y - Y_1}{\sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}} \\ \dots & \dots \\ \frac{x - X_{M'}}{\sqrt{(x - X_{M'})^2 + (y - Y_{M'})^2}} & \frac{y - Y_{M'}}{\sqrt{(x - X_{M'})^2 + (y - Y_{M'})^2}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

重み行列  $W$  は，測距値の重み  $w_i$  を要素とする対角行列とする (式 (10))．

$$W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_{M'}) \quad (10)$$

測距値の重み  $w_i$  は，式 (2) で定義される誤差の推定値  $\epsilon_i$  をもとに，式 (11) により決定する．

$$w_i = (1/\epsilon_i)^2 \quad (11)$$

上記の重み付けにより，位置誤差や測距誤差が大きいと想定されるアンカが測位対象ノードの位置推定精度に与える影響を緩和することができる．

### 4.4 ノードの測位間隔

移動速度が速いノードは高い頻度で測位を実行し，ノードの移動に位置情報の更新頻度を



追従させることが望ましい．一方，静止しているノードは測位頻度を下げることによって，位置推定精度に影響を与えることなく測位回数を軽減することができる．本手法では，ノードの推定移動速度  $v_i$  および推定移動状態に基づき，各ノードが測位間隔を自律的に調整する．

ノードの推定移動速度は，測位実行時に更新する．測位によって得られた新たな推定位置が  $\theta(t_j)$ ，前回の測位時の推定位置が  $\theta(t_{j-1})$  であるとき，ノードの推定移動速度  $v_i$  は式 (12) により算出される．ただし，現時刻を  $t_j$ ，前回測位を行った時刻を  $t_{j-1}$  とする．

$$v_i = \frac{\|\theta(t_j) - \theta(t_{j-1})\|}{t_j - t_{j-1}} \quad (12)$$

これは，前回測位時からの平均移動速度に相当する．なお，前回測位時からの推定移動距離  $\|\theta(t_j) - \theta(t_{j-1})\|$  が，時刻  $t_j$  および  $t_{j-1}$  における推定位置誤差  $\sigma_{p_i}(t_j), \sigma_{p_i}(t_{j-1})$  の和よりも小さい場合，推定位置の変化は誤差に起因すると考えられるため， $v_i = 0$  と見なす．

$v_i > 0$  のとき，ノード  $A_i$  は自身の移動状態を移動と判定する．移動ノードと推定される場合には，次に測位を行うまでの時間間隔  $I_v(v_i)$  を式 (13) により定める．

$$I_v(v_i) = \min \left\{ I_{v_{max}}, \frac{1}{cv_i} \right\} \quad (v_i > 0) \quad (13)$$

$c$  は，単位移動距離あたりの測位回数を表すパラメータであり，要求される移動分解能に応じて決定する．また，測位間隔の上限値  $I_{v_{max}}$  を定め，静止状態から移動を開始したノードや低速で移動するノードに対して不当に長い測位間隔が割り当てられることを防ぐ．

一方， $v_i = 0$  のとき，ノード  $A_i$  は自身を静止ノードと判定する．この場合，次に測位を実行するのは，あらかじめ定められた時間間隔  $I_s$  が経過した後とする．静止ノードが周辺の測位ノードから測距信号を受信した場合には，自身の位置情報と得られた距離情報をそのノードへ送信する．自身を静止ノードと判定してから測距信号を受信するまでの間に自身が移動していた場合，測位ノードによってその移動が検出されれば，測位ノードから移動通知メッセージが受信される．移動通知メッセージを受け取った場合には，推定移動状態を移動に変更したうえでただちに測位を行い，位置情報と推定移動速度を更新する．このように，静止中は，測位ノードからの移動通知メッセージの有無によって自身の移動状態を判定する．

ただし，測位ノードとの位置関係やノードの移動方向によっては，測距結果に基づく移動検出がうまく機能しない場合がある．図 3 にその一例を示す．同図 (a) のように，ノード  $A_1$  の移動による測位ノード  $A_0$  とノード  $A_1$  の相対距離の変化量  $|d_1 - d'_1|$  が大きい場合には， $A_1$  が移動ノードとして検出される可能性が高い．しかし，同図 (b) のように， $A_0$

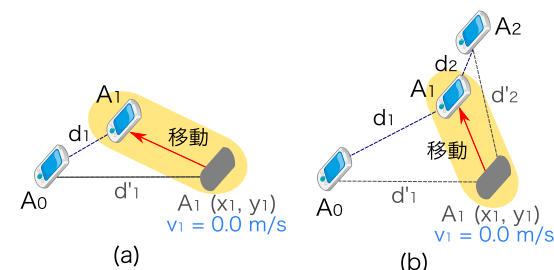


図 3 移動検出結果の統合

Fig. 3 Movement detection from multiple nodes.

と  $A_1$  との相対距離の変化量  $|d_1 - d'_1|$  が小さい場合には，移動距離が長い場合であっても， $A_1$  の移動が  $A_0$  によって検出されにくくなる．一方，ノード  $A_2$  からの相対距離の変化量  $|d_2 - d'_2|$  は大きいため，ノード  $A_2$  が測位を行う際には，ノード  $A_1$  の移動が検出される可能性が高い．そこで，静止中の移動状態の判定は，複数の測位ノードによる移動検出結果を統合することにより行う．具体的には，自身を静止ノードと判定してから時間間隔  $I_s$  が経過するまでに， $m$  個の測位ノードから測距信号を受信し，いずれのノードからも移動通知メッセージが受信されないときは，改めて，自身の移動状態を静止と判定する．次に測位を行うのは，この時点から時間間隔  $I_s$  が経過した後とする．この繰返しにより，周辺の測位ノードから静止ノードと判定され続ける限り測位は実行されない．

最後に，測位に失敗した場合の測位間隔について述べる．測位を行う際，参照可能なアンカの数  $n$  が 3 つよりも少ない場合には，最小二乗法による推定位置の導出ができないため，測位は失敗となる．測位に失敗した場合には，短い間隔  $T_f$  待機した後，再測位を行う．2 回目の測位も失敗した場合には，測位の間隔を  $2T_f$  とする．以降同様に，連続失敗回数  $F$  に対し，測位間隔を  $FT_f$  とする ( $F \leq F_{max}$ )．このように，測位に失敗した回数に応じて測位間隔を変化させることで，再測位可能な場合には速やかに推定位置を更新し，周囲にアンカとして利用可能なノードがない場合には，測位頻度を下げることができる．

#### 4.5 通信プロトコル

提案手法では，各ノードが自律的に測位のタイミングを決定するため，あるノードが測位を行っているときに，近接する他のノードが同時に測位を試みる可能性が考えられる．複数のノードが同時に測距信号を発信した場合，信号の干渉によって測距結果に誤差が生じたり，測距に失敗したりする可能性が高い．そこで本手法では，ノード間でメッセージ交換を

行うことにより、測距信号の同時送信を防ぐ。

あるノードが測位を行う場合、はじめに測位要求メッセージ (RTM: Request To Measure) をブロードキャストし、周辺ノードに対して測位の開始を通知する。また、各ノードは測距信号用の帯域が他のノードによって占有されている時間 (NAV: Network Allocation Vector) を表すタイマを持つ。RTMメッセージを受信したノードは、RTMメッセージ送信から測位完了までに要する時間 (帯域占有時間  $T_{cycle}$ ) を NAV タイマにセットし、時間の経過とともに、タイマの値を減少させる。 $T_{cycle}$  は、測位ノードが測距信号を送信した後、壁などの障害物による反射波の影響がなくなるまでの時間を考慮し、パラメータとして与える。各ノードは、(1) 測位間隔が経過したとき、または (2) 移動通知メッセージを受信したときに測位タイミングとなるが、NAV タイマの値が 0 より大きい場合は測位を延期する。

RTMメッセージによって測位を抑制されていたノードは、NAV タイマが 0 になった時点で測位処理を開始する。このとき、RTMメッセージの送信前に、待ち時間に応じたバックオフ時間を挿入することで、特定のノードが長時間にわたって測位を抑制され続けることを回避する。測位タイミングとなってから、NAV が 0 になるまでの経過時間が  $t$  であるとき、バックオフ時間  $T_{backoff}$  は式 (14) により決定する。

$$T_{backoff} = CW \cdot \exp(-at) \quad (14)$$

$CW$  はバックオフ時間の最大値である。 $CW$  の値を大きくすることで、RTMメッセージの衝突確率を減らすことができるが、1回の測位に必要な時間も長くなるため、ノード密度などに応じて適切な値を選択する。また、 $a$  はバックオフ時間の特性を決定する定数である。

測距信号の到達距離が  $r$  である場合、RTMメッセージの到達距離  $R$  が  $2r$  よりも大きくなるように無線出力を調整する。測位対象ノードからの距離が  $R$  よりも離れているノードは同時に測位を行えるが、2つの測位対象ノードの間の距離は  $2r$  よりも大きいため、測距信号の衝突は発生しない。以上のプロトコルによって、各ノードが測位のタイミングを自律的に決定する環境において、周辺ノードとの測距を確実に実行する機構を実現している。

## 5. 性能評価

提案手法の性能を評価するため、ネットワークシミュレータ QualNet<sup>15)</sup> を用いてシミュレーションを行った。本章では、シミュレーションの想定環境および評価結果を示す。

### 5.1 シミュレーション環境

測位の対象となるフィールドは、図 4 のような 15 (m) × 15 (m) の正方形領域とし、

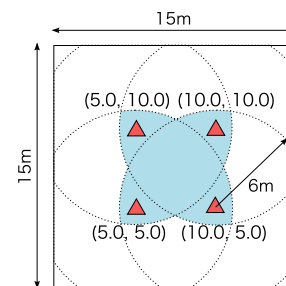


図 4 フィールドの設定  
Fig. 4 Target field.

(5.0, 5.0), (10.0, 5.0), (5.0, 10.0), (10.0, 10.0) の 4 地点にランドマークを配置した。図 4 において色付きで表した領域では、測距信号の到達距離内に 3 つ以上のランドマークをとらえることができ、ランドマークとの直接通信のみによって測位が可能である。一方、それ以外の領域では、静止ノードの位置情報を間接的に利用して位置推定を行う必要がある。

ノードのモビリティは Random Waypoint (RWP) とし、確率  $p$  ( $p = 0.1 \sim 0.9$ ) でフィールド内のランダムな位置へ移動し、確率  $(1-p)$  でその場に 10 秒間停止するとした。移動速度は歩行者の移動速度を想定し、 $[4.0, 8.0]$  (km/h) の一様分布とした。ノード数は 30 とし、ノード間の通信プロトコルは IEEE802.11b を想定した。また、ノード間の測距誤差は、平均 0 の正規分布  $N(0, \sigma^2)$  に従うものとし、標準偏差  $\sigma$  は、ノード間の距離が  $d$  (m) であるとき、 $\sigma = 0.01d$  として与えた。また、提案手法で測距誤差の推定値を決定する際に用いるパラメータ  $\sigma_0$  (式 (3)) も 0.01 とする。測距信号の到達距離  $r$  は 6 (m)、制御メッセージの到達距離は 12 (m) とした。

RTMメッセージ送信時のバックオフ時間の最大値  $CW$  は 20 (ms)、測位実行時の帯域占有時間  $T_{cycle}$  は 70 (ms) とした。また、IEEE802.11b では、キャリアセンス機構によってパケットの衝突を回避するため、パケット送信時の待ち時間が著しく大きくなる場合がある。本シミュレーションでは、パケット送信時の待ち時間が 10 (ms) より大きくなる場合にはそのパケットを破棄するものとした。初期解の候補点の生成密度に関するパラメータは、 $\delta_{max} = 100$  ( $/m^2$ )、 $\delta_{min} = 10$  ( $/m^2$ )、 $M_{max} = 15$  とし、最小二乗法による推定位置の導出では、各反復ステップにおいて、 $\|\theta_{i+1} - \theta_i\| < 0.01$  を満たすか、反復回数が 1,000 回に達するまで繰り返し探索を行う。その他の提案手法のパラメータは表 1 に示すとおりと

表 1 パラメータの設定  
Table 1 Parameter settings.

ノードの最大移動速度 $V_{max}$	10.0 (km/h)
移動ノードの測位間隔の係数 $c$	0.80
移動ノードの測位間隔の上限値 $I_{vmax}$	3.0 (秒)
静止判定の閾値 $m$	3
バックオフ時間の係数 $a$	0.76
静止ノードの測位間隔 $I_s$	5.0 (秒)
測位失敗時の単位測位間隔 $T_f$	1.0 (秒)
測位失敗時の最大測位間隔 $F_{max}T_f$	5.0 (秒)
推定位置誤差の許容値 $\sigma_{pmax}$	1.0 (m)
移動検出の閾値の下限 $\epsilon_{min}$	0.30 (m)

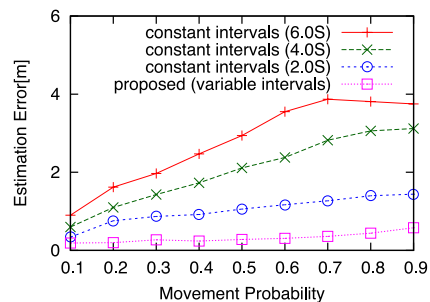


図 5 位置推定精度

Fig. 5 Estimation accuracy.

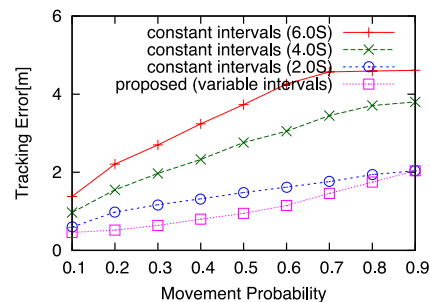


図 6 位置トラッキング精度

Fig. 6 Realtime position accuracy.

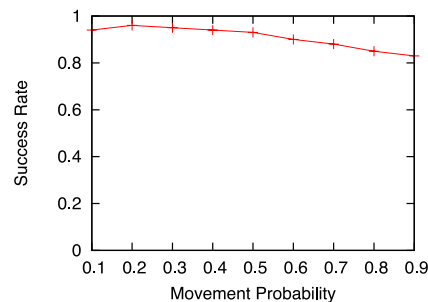


図 7 測位成功率

Fig. 7 Success rate of localization.

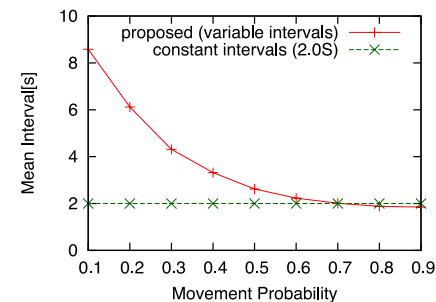


図 8 提案手法の平均測位間隔

Fig. 8 Mean interval of localization attempts.

する。

以上の環境で 3,000 秒間のシミュレーションを行い、ノードの移動状態の検出を行わず、各ノードが一定の時間間隔 (6.0 秒, 4.0 秒, 2.0 秒) で測位を実行した場合と性能を比較した。比較手法では、測位ノードから測距信号を受信したすべての周辺ノードが測距結果を返答し、測位ノードは測距結果が得られたすべての周辺ノードをアンカとして位置推定を行う。それ以外の動作については 4.2 節, 4.3 節, 4.5 節の方法をそのまま用いるものとする。

## 5.2 評価結果

### 5.2.1 位置推定精度

はじめに、位置推定精度の評価結果について述べる。位置推定精度は、ノードの測位が成功した直後の推定位置の誤差を全ノードおよび全シミュレーション時間で平均することにより算出した。その結果を図 5 に示す。

ノードの移動状態の検出を行わず、位置情報が既知であるすべての周辺ノードをアンカとして利用した場合には、移動ノードが持つ大きな位置誤差が測位ノードに伝播することにより位置精度が悪化し、平均位置推定誤差は 0.34 (m) ~ 3.87 (m) となった。これに対し、提案手法では、静止中と判定されるノードのみをアンカとして利用することから、平均誤差は 0.17 (m) ~ 0.58 (m) となり、高い位置推定精度が得られた。

また、移動端末の位置推定では、位置推定精度に加えて、位置情報のリアルタイム性が重要となる。そこで、ノードの測位タイミングとは独立に、すべてのノードの位置誤差を 1 秒間隔で評価し、それらの平均をとることで、各ノードの位置情報がノードの移動に対してどれだけ追従できているか (位置トラッキング精度) を評価した。その結果を図 6 に示

す。提案手法は、静止していると想定されるノードをアンカとして選択することで位置推定精度の向上を実現するため、ノードの移動性が高い環境では、3 つ以上のアンカを参照できず、測位に失敗する頻度が增大する (図 7)。一方、アンカの選択を行わず、一定の時間間隔で測位を行った場合、必ず測位が行われるが、位置推定精度の悪化がトラッキング性能にも影響を与える。これらはトレードオフの関係にあるが、本シミュレーション環境では、 $p = 0.1 \sim 0.9$  のいずれの場合においても、2 秒一定間隔で測位を行った場合と同等以上のトラッキング性能が得られた。

### 5.2.2 測位頻度

提案手法において、ノードが測位を実行する平均時間間隔 (測位に失敗した場合も含む) は図 8 のようになった。提案手法では、移動ノードのみを測位の対象とするため、ノードの移動確率が低いほど平均測位間隔が長くなり、測位頻度が軽減されている。平均測位間隔は、移動確率が 0.1 のとき 8.65 秒、移動確率が 0.4 のとき 3.47 秒となり、全ノードを 2 秒一定間隔で測位した場合と比較して、同程度の位置トラッキング精度を実現するために必要な測位回数が軽減されていることが分かる。一般に、ノードの移動性が高い場合には、各ノードを高頻度で測位する必要があるが、同時に測位を実行可能なノード数には限りがあるため、提案手法ではノードの移動確率  $p$  が 0.9 と高い場合であっても測位間隔は 1.98 秒と、極端に短くなることはない。

### 5.2.3 移動状態の検出

前回の測位時から 0.50 (m) 以上移動したノードが、測位ノードによって移動ノードと判定された割合 (移動検出成功率) を図 9 に示す。提案手法では、0.48 ~ 0.70 の移動検出成



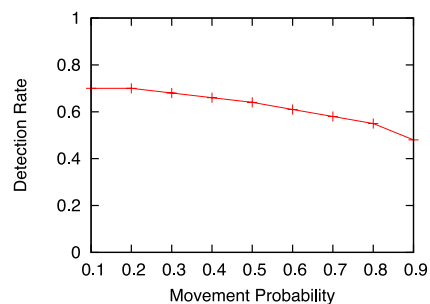


図 9 移動検出成功率

Fig. 9 Detection rate of node movements.

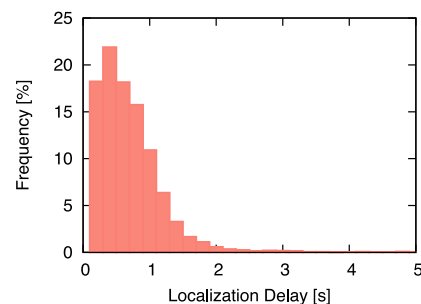


図 10 測位待ち時間の分布

Fig. 10 Distribution of localization delay.

功率が実現されている．測位ノードによる移動検出の成功率を  $p_d$  とすると，静止状態から移動を開始したノードが  $m$  個の測位ノードのアンカ候補となり，いずれのノードにおいても移動が検出されない確率は  $(1 - p_d)^m$  となる．性能評価では  $m = 3$  としていることから，実質的な移動検出成功率は 86%~97% となり，移動ノードを高い確率で検出できることが分かった．

また，静止状態にあったノードが移動を開始してから最初に測位を試みるまでの遅延時間の分布は図 10 のようになった．移動開始から 1 秒以内に測位が実行される確率は 85% となり，ノードの移動に対する高い追従性が認められた．

#### 5.2.4 ノード密度の影響

ノード密度が位置トラッキング精度に与える影響を評価するため，ノード数を 50~200 の範囲で変化させた．ノードのモビリティの設定は前項と同様とし，ノードの移動確率  $p$  は 0.3 とした．また，測距信号の到達距離  $r$  は 5 (m), 4 (m), および 3 (m) とし，RTM メッセージの到達距離  $R$  は  $R = 2r$  とし与えた．ランドマークは図 4 と同様，フィールドの中央の 4 地点に  $r$  (m) 間隔で設置した．ランドマークの設置間隔を  $r$  (m) とするのは，3 つ以上のランドマークと測距を行い，ランドマークのみで測位可能な領域を形成するためである．以上の条件で位置トラッキング精度を評価した結果を図 11 に示す． $r = 5$  (m) の場合，ノード数が 50~100 (ノード密度  $0.22/\text{m}^2 \sim 0.44/\text{m}^2$ ) の範囲では高い位置トラッキング精度が得られているが，ノード密度が  $0.44/\text{m}^2$  よりも大きい場合，位置トラッキング誤差が急激に大きくなっている．これは，ノード密度の増加によって多数のノードが同時に測位タイミングとなる状況が頻繁に発生し，測位が実行されるまでの待ち時間が長くなったため

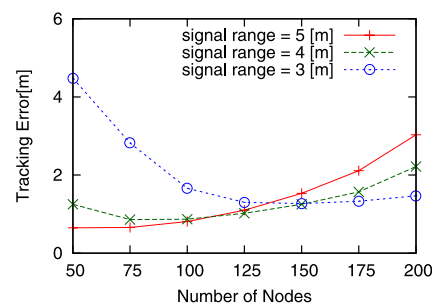


図 11 ノード密度と位置推定精度

Fig. 11 Node density vs. realtime accuracy.

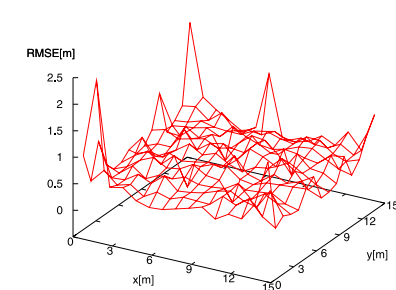


図 12 誤差の空間的分布

Fig. 12 Spatial distribution of tracking error.

と考えられる．一方， $r = 4$  (m),  $r = 3$  (m) とした場合には，フィールド内で同時に測位可能なノードの数が增加することにより，ノード密度が高い領域において精度の改善が見られる．このように，想定されるノード密度に応じて測距信号の到達距離を調整することで，高精度な位置推定を実現できる．

また，ノードの位置推定を行う際，式 (4) で定義されるノードの推定位置誤差  $\sigma_{p_i}$  が閾値  $\sigma_{p_{max}}$  より大きくなることによる測位失敗の頻度は，ノード密度によらず，総測位回数に対しておおむね 2% 前後となり，ノード密度が高く，測位時のアンカ候補の数が多環境においても，推定位置の初期解を求める際の尤度最大の候補点は比較的狭い領域に分布することが分かった．

#### 5.2.5 誤差の空間的分布

位置トラッキング誤差の空間的な分布を図 12 に示す．これは，ノードの移動確率を 0.3 にした場合の位置トラッキング誤差を，ノードの位置ごとに平均したものである．フィールドの境界付近では参照できるアンカの数が少なくなるため，測位成功率が低下し，誤差が大きくなっている．一方，それ以外の場所では，3 つ以上のランドマークと直接測距を行えない場合にも，静止ノードの位置情報を間接的に用いることによって，高い精度が得られた．

#### 5.2.6 測距誤差の影響

提案手法は測距方法とは独立であるため，測距誤差をおおまかに予測することができれば，TDoA 以外の測距手法も適用可能である．測距誤差が提案手法の性能に与える影響を評価するため，測距誤差が平均 0 の正規分布  $N(0, \sigma^2)$  に従うとし，標準偏差  $\sigma$  がノード間の距離  $d$  に対し  $\sigma = kd$  ( $k = 0.03, 0.09, 0.15$ ) で与えられるとした場合の位置推定精

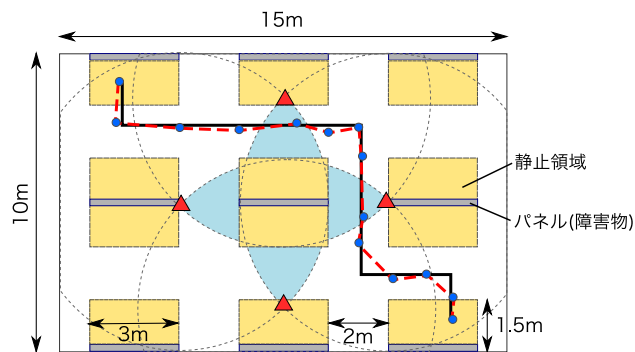


図 13 イベント会場における適用例  
Fig. 13 Application in exhibition hall.

度、位置トラッキング精度、および移動検出成功率を評価した。提案手法において測距誤差を推定する際のパラメータ  $\sigma_0$  は  $k$  と同じとした。また、ノードの移動確率  $p$  は 0.30、推定位置誤差の許容値  $\sigma_{pmax}$  は 2.0 (m) とし、その他のシミュレーション環境は 5.1 節と同様とした。測距信号の到達距離  $r$  はいずれも 6 (m) としているため、 $k = 0.15$  の場合、測距誤差の標準偏差  $\sigma$  は最大 0.90 (m) となる。

評価の結果、平均位置推定誤差は 0.28 (m) ~ 1.68 (m) となり、測距誤差が大きい場合にも、測位成功時には比較的高い位置推定精度が得られることが分かった。一方、測距誤差や位置誤差が大きい場合、4.2 節の移動検出アルゴリズムにおける誤差の推定値  $\epsilon_i$  の値も大きくなるため、短い距離の移動が検出されにくくなり、トラッキング性能が低下する。本シミュレーションにおける移動検出成功率は  $k = 0.03$  のとき 67%、 $k = 0.15$  のとき 22% となり、トラッキング誤差の評価結果は 0.71 (m) ~ 3.19 (m) となった。屋内環境における有意な位置情報としては、一般に数 m 程度の精度が求められると想定されるため、上記の結果より、提案手法が適用可能な測距誤差の許容値はおおよそ 1 (m) 程度と考えられる。

### 5.3 実用例

提案手法の実用例の 1 つとして、ポスタセッション会場における来場者の位置推定を考える。測位の対象となる領域は大きさ 10 (m)  $\times$  15 (m) の室内とし、図 13 において三角形で示した 4 地点にランドマークを配置した。また、会場内の 9 か所にパネルが設置され、測距信号はパネルによって遮断されるとした。ノード数は 30 とし、モビリティモデルは RWP を用いた。ポスタセッションでは、各パネルの周辺において多くのノードが静止している

と想定されることから、各パネルの前方 1.5 (m) の領域ではノードの停止時間を 60 秒、それ以外の場所では停止時間を 10 秒とし、移動確率は一律 0.5 とした。また、測距誤差は正規分布に従うとし、標準偏差は、ノード間の距離が  $d$  のとき  $0.03d$  として与えた。測距信号の到達距離  $r = 5$  (m)、RTM メッセージの到達距離  $R = 10$  (m) とし、その他のシミュレーション環境は 5.1 節と同様とした。

上記の環境に、1.0 (m/s) の一定速度で (2.0, 9.0) から (13.0, 1.0) へ移動するノードを追加した場合の実際の移動軌跡 (実線) と推定位置の履歴 (破線) を図 13 に示す。全ノードの平均測位間隔が 5.11 秒となったのに対し、このノードの平均測位間隔は 1.26 秒となり、ノードの移動に追従して高い頻度で測位が実行されたことが分かった。また、全シミュレーション時間における平均位置トラッキング誤差は 0.85 (m) となり、現実的な環境下においても、高い位置精度が得られることが確認された。

なお、現実環境では、障害物などにより測距信号の直接波が遮断され、壁などの構造物による反射波のみが受信される場合がある。反射波はノード間の直線距離よりも長い距離を伝播するため、このような状況下では大きな測距誤差が生じる可能性がある。提案手法では、測距誤差が予測値に比べて大きいアンカ候補は 4.2 節の移動検出アルゴリズムにより移動ノードとして検出されるため、反射波による位置推定精度の著しい悪化を防ぐことができる。しかし、静止中のアンカ候補が測位ノードによって移動中のノードとして誤検出され、移動通知メッセージを受信することにより、本来不要な測位が実行されるという問題がある。このため、受信された測距信号が直接波か反射波かを判別し、反射波と推定される場合には、移動通知メッセージの受信による再測位を抑制することが望ましい。反射波の検出方法については、超音波を用いた既存の屋内測位システムでも検討が行われている<sup>10),16)</sup>。本提案手法に対しては、距離と信号強度との関係を事前実験により取得し、反射波は伝播および反射による減衰により直接波に比べて信号強度が弱くなるという仮定のもと、受信信号強度が弱い波を反射波として検出する方法などが有効であると考えられる。

## 6. ま と め

本論文では、断続的に移動する無線端末群を少数のランドマークで高精度に測位するための分散協調型位置推定手法を提案した。提案手法では、ノード間の測距結果に基づきノードの移動状態を推定し、位置誤差が比較的小さいと想定される静止中のノードのみを位置基準として位置推定を行うことで、ノード間における誤差の伝播を抑制した。また、検出された移動状態および移動速度をもとに各ノードが測位頻度を自律的に調整することで、位

置精度を維持しつつ測位回数の軽減を図った。シミュレーション実験により、ノードの移動状態の検出を行わず、全ノードが一定頻度で測位を行った場合と比較して、位置推定精度が44%~91%改善されることを示した。また、比較手法と同等のトラッキング性能を実現するために必要な測位回数を最大77%軽減できることが確認された。今後の課題としては、信号伝播チャネルの状態による信号到達距離の変動や、測距デバイスの指向性といった、実環境を想定したプロトコルの改良を考えている。

### 参 考 文 献

- 1) Priyantha, N., 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).
- 2) Zhao, F., Shin, J. and Reich, J.: Information-driven dynamic sensor collaboration, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.19, No.2, pp.61-72 (2002).
- 3) Brooks, R.R., Griffin, C. and Friedlander, D.S.: Self-organized distributed sensor network entity tracking, *International Journal of High Performance Computing Application*, Vol.16, No.3, pp.207-219 (2002).
- 4) Chen, W.P., Hou, J.C. and Sha, L.: Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks, *Proc. 11th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2003)*, pp.284-294 (2003).
- 5) Arulampalam, M.S., Maskell, S., Gordon, N. and Clapp, T.: A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.50, No.2, pp.174-188 (2002).
- 6) Taylor, C., Rahimi, A., Bachrach, J., Shrobe, H. and Grue, A.: Simultaneous localization, calibration, and tracking in an ad hoc sensor network, *Proc. 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2006)*, pp.27-33 (2006).
- 7) Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y. and Fromherz, M.: Localization from connectivity in sensor networks, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.15, No.11, pp.961-974 (2004).
- 8) Savarese, C., Rabaey, J.M. and Langendoen, K.: Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks, *Proc. General Track of the Annual Conference on USENIX Annual Technical Conference*, pp.317-327 (2002).
- 9) Savvides, A., Park, H. and Srivastava, M.B.: The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems, *Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks Applications (WSNA 2002)*, pp.112-121 (2002).
- 10) Minami, M., Fukuju, Y., Hirasawa, K., Yokoyama, S., Mizumachi, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: DOLPHIN: A Practical Approach for Implementing a Fully Distributed Indoor Ultrasonic Positioning System, *Proc. 6th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004)*, pp.347-365 (2004).
- 11) Fujii, S., Nomura, T., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Real-time trajectory estimation in mobile ad hoc networks, *Proc. 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2009)*, pp.163-172 (2009).
- 12) Ji, X. and Zha, H.: Sensor positioning in wireless ad-hoc sensor networks using multidimensional scaling, *Proc. 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004)*, pp.2652-2661 (2004).
- 13) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad hoc positioning system (APS), *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2001)*, pp.2926-2931 (2001).
- 14) Mao, G. and Fidan, B. (Eds.): *Localization algorithms and strategies for wireless sensor networks*, Information Science Reference (2009).
- 15) 構造計画研究所: QualNet. <http://www4.kke.co.jp/network/products/qualnet/>
- 16) Ward, A.: Sensor-driven Computing, Ph.D. thesis, University of Cambridge (1998).
- 17) 樋口雄大, 藤井彩恵, 山口弘純, 東野輝夫: 静止ノードの検出により測位回数を抑制する移動無線ネットワーク向け位置推定, 情報処理学会創立50周年記念(第72回)全国大会論文集, Vol.3, pp.511-512 (2010).
- 18) 樋口雄大, 藤井彩恵, 山口弘純, 東野輝夫: 断続的に移動する無線ノード群の位置推定, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2010)シンポジウム論文集, pp.1210-1220 (2010).

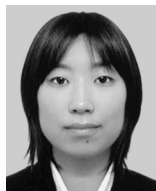
(平成22年4月9日受付)

(平成22年10月4日採録)



樋口 雄大(学生会員)

平成22年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。同年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やモバイルコンピューティングに関する研究に従事。



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やモバイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE Student Member。



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。