

歩行者の移動特性を考慮した 協調型位置推定手法の性能評価

樋口 雄大^{†1} 藤井 彩恵^{†1}
山口 弘純^{†1,†2} 東野 輝夫^{†1,†2}

高度な位置情報サービスの実現のため、ショッピングモール等の広域な屋内環境においてモバイル端末を低コストかつ高精度にトラッキングする技術が求められている。本稿では、我々の提案する、歩行者の移動の断続性に着目したモバイル端末向け協調型位置推定手法の性能を評価する。フィールド実験により取得した歩行者の位置トレースと実機実験に基づく測距誤差モデルを用いて実環境を想定したシミュレーション実験を行い、提案手法が実環境において高い測位効率を実現できることを示した。

Performance Evaluation of a Cooperative Localization Method considering Pedestrian Behavior

TAKAMASA HIGUCHI,^{†1} SAE FUJII,^{†1}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2} and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

For advanced location-based services, accurate and cost-efficient tracking techniques for mobile devices in wide indoor environments are highly demanded. This paper provides performance evaluation of a cooperative localization algorithm considering common stop-and-go behavior of mobile nodes. Real mobility traces and a real ranging error model were obtained by preliminary experiments and employed for the evaluation. The experimental results demonstrated that our method achieved high localization efficiency in real environment.

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Univ., Osaka Japan

^{†2} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

1. はじめに

モバイル端末の高機能化により、ヒューマンナビゲーションをはじめとする位置情報サービスが日常生活の中で広く利用されるようになった。従来、位置情報サービスの利用シーンはGPSによる測位が可能な屋外環境に限られてきたが、展示会や美術館、ショッピングモールといった屋内環境においてモバイル端末を高精度に測位できれば、こうしたサービスの利便性を飛躍的に向上することができる。こうした背景から、広域な屋内環境においてモバイル端末を低コストかつ高精度に測位することが、近年の重要な技術課題となっている。

屋内向け測位技術としては、IMES¹⁾など、位置既知の固定端末(ランドマーク)を環境内に配置する方式が数多く提案されてきたが、広いエリアをカバーするためには多数のランドマークを設置する必要があるため、システムの導入や保守に要するコスト上の問題から普及が進んでいないのが現状である。

限られたインフラを用いて低コストに測位を実現するためには、近隣の端末の推定位置と端末間の相対距離に基づき測位を行う協調型アプローチが有効であると考えられる。協調型アプローチでは、ランドマークに加えて近隣の端末の推定位置を位置基準点として用いることで、ランドマークと直接測距できない端末も測位を行うことができる。既存の協調型位置推定手法の多くは端末の移動を考慮していないため、これらの手法をモバイル端末の測位に適用する場合はいくつかの問題がある。まず、移動中の端末は移動距離に応じて大きな位置誤差を持つと考えられるため、こうした端末の推定位置を位置基準点として測位を行った場合、測位精度が著しく悪化する可能性が高い。また、モバイル端末をリアルタイムにトラッキングするためには、ネットワーク内のすべての端末が高い頻度で推定位置を更新する必要があるが、端末のバッテリー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。

展示会やスーパーマーケットといった屋内位置情報サービスの利用シーンでは、一般に、歩行者は移動と静止を繰り返している。例えば展示会の場合、来場客は会場内を巡回し、興味を持った展示ブースの前で立ち止まる。我々はこうした歩行者の移動の断続性に着目し、少ない測位回数で高精度なトラッキングを実現するモバイル端末向けの分散協調型位置推定手法を提案している²⁾⁻⁴⁾。提案手法では、近隣の端末(ノード)との測距結果をもとに一時的に静止しているノードを検出し、ランドマークの位置および静止中のノードの推定位置のみを位置基準点として用いることで、移動中のノードからの位置誤差の伝播を抑止する。また、移動状態の検出結果に基づき静止中のノードのみ測位頻度を下げることで、トラッキング性能を維持しつつネットワーク全体の測位回数を抑える。

文献 3), 4) では, ノードの移動性やノード密度等が提案手法の性能に与える影響を基本的な測距誤差モデルと Random Waypoint モビリティモデルを用いて評価しているが, 提案手法の性能はノードの移動の性質や測距誤差に依存するため, 実環境への適用可能性についてはさらなる検討が必要である. 本稿では, 提案手法の実環境における性能を, フィールド実験および実機実験に基づき評価する. フィールド実験では, ポスターセッション会場を模した実験環境を構築し, 発表者および聴衆の位置トレースを取得した. また, 実機を用いた測距実験を行い, 実測結果に基づく測距誤差モデルを構成した. これらの実験により得られた実トレースおよび測距誤差モデルを利用し, 提案手法の測位性能をシミュレーションにより評価した. 実験の結果, 提案手法では従来手法に比べて測位頻度を 57% ~ 64% 軽減しつつ, 位置推定精度を 73 ~ 95% 改善できることが分かった. この結果より, 提案手法の高い測位効率を示された. さらに, ランドマークの設置数や配置パターン, 測距精度といった環境要因が提案手法の性能に与える影響についても評価を行った.

次章以降の構成は次の通りである. 2 章では屋内測位技術の研究動向および既存手法と提案手法の差違について述べる. 3 章では我々が提案する歩行者の移動特性を考慮した協調型位置推定手法について簡潔に説明する. 4 章ではフィールド実験による位置トレースの取得および実機実験に基づく測距誤差モデルの構築について述べる. また, これらの実験結果に基づく性能評価を 5 章で示す. 最後に, 6 章でまとめと今後の課題について議論する.

2. 関連研究

既存の屋内向け測位技術の多くは固定のインフラに依存している. 例として RFID タグを用いた測位手法^{5), 6)} などが挙げられるが, 展示場などの広い領域をカバーするためには, タグの無線レンジの制約により膨大な数のタグを設置する必要があり, 多くのコストを要する. また, 既存のインフラを利用する方式として, 環境内の各地点において Wi-Fi 基地局からの受信電波強度を計測・学習することで電波強度マップを作成し, 観測された電波強度と電波強度マップとのマッチングによりノードの位置を推定するフィンガープリント方式^{7), 8)} が提案されているが, 電波強度の事前学習には同様に多くの手間とコストが必要となる.

協調型位置推定手法は, RFID タグや Wi-Fi 基地局といったランドマークとの通信や測距に加えて近隣ノードとの間で情報を交換することにより, 少ないコストで広域の測位を実現する. DOLPHIN⁹⁾ は, 各ノードがランドマークおよび測位済みの近隣ノードと測距を行い, 十分な数の測位済みノードとの距離情報が得られたノードから逐次的に位置を決定する. また, 文献 10), 11) では各ノードの推定位置に対して信頼度を定義し, 測位精度の向

上に利用している. これらの既存手法ではノードの移動が想定されていないため, モバイル端末の測位に適用する場合には, ノード間における位置誤差の伝播や測位頻度の増大などが問題となる. 一方, TRADE¹²⁾ のようにモバイル端末間のアドホック通信に基づく協調型位置推定手法も研究されているが, 屋内環境では障害物によるマルチパス等の影響で通信が不安定になるため, 十分な精度が得られない場合がある.

文献 2)–4) で我々が提案した分散協調型位置推定手法では, 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, 静止中のノードの推定位置のみを位置基準点として選択することで測位精度の向上を図る. また, 静止中のノードの測位実行を抑制することにより, トラッキング性能を維持しつつ, ネットワーク全体の測位回数を軽減する. このように, ノードの移動特性に着目し, 測位精度の向上と測位回数の軽減を図るというアイデアは, 我々が知る限りこれまでに提案されておらず新規性が高い.

3. 歩行者の移動特性を考慮した協調型位置推定手法

3.1 想定環境

各ノードは電波と超音波の送受信モジュールを保持しており, 2 種類の信号の到達時間差 (Time Difference of Arrival: TDoA) をもとに近隣ノードとの距離を測定できると仮定する. 超音波デバイスを用いた TDoA 測距技術は, 精度数 cm 程度の精確な測定が行えることから屋内環境における高精度な測位に適しており, Cricket¹³⁾ や DOLPHIN⁹⁾ など, 既存の多くの屋内測位システムで利用されている. なお, 超音波信号は指向性を持つため, 各ノードは前方および左右の 3 方向 (ランドマークは後方を含む 4 方向) に超音波の送受信機を装備しており, 全方向に対して測距信号を送受信できると仮定する.

3.2 提案手法の概要

提案手法では, 各ノードが近隣ノードとの測距結果をもとに移動状態を協調的に推定する. また, 移動中であると推定されるノードは, 静止中の近隣ノードの推定位置を位置基準点として測位を実行し, 自身の推定位置および移動状態 (“移動” または “静止”) を更新する. 以下では, 提案手法の測位プロセスを簡単に説明する.

測位を実行するノードは, はじめに近隣ノードに対して測距信号を発信する. 測距信号を受信した近隣ノードは, 自身の移動状態が “静止” であれば, 電波と超音波の TDoA をもとに測位ノードとの距離を推定し, 測距結果および自身の位置情報を測位ノードへ返答する. ノードの移動状態は原則として測位実行時に更新されるため, このとき測距結果を返答した “静止” ノードの中には, 実際にはすでに前回の測位地点から移動を開始したノードが

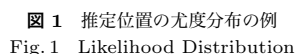


図 1 推定位置の尤度分布の例
Fig. 1 Likelihood Distribution

ある近隣ノード A_j との測距値を d_j とした場合、測位ノードの位置はノード A_j の推定位置 $\phi_j = (x_j, y_j)$ を中心とする半径 d_j の円周の近傍と推定される。提案手法では A_j の位置誤差および測距誤差の推定結果に基づき式 (1) により推定誤差 ϵ_j を決定し、図 1 のように ϕ_j を中心とする半径 d_j 、幅 $2\epsilon_j$ の円環領域を測位ノードの存在領域と仮定する。

ここに、 σ_{p_j} は A_j の位置誤差の推定値、 σ_{r_j} は A_j との測距誤差の推定値である。 A_j の位置誤差は A_j の測位プロセスの中で A_j 自身が推定し、測距結果とともに測位ノードへ送信される。位置誤差の具体的な推定方法については後述する。また、ノード間で LOS (line of sight) が確保されている場合、測距誤差は正規分布に従うと想定される。一般に、測距誤差は距離に応じて増大することから、提案手法では測距誤差を式 (2) により推定する。

σ_0 はノード間の距離が 1m 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．

$$\sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \{(x^{(u)} - \bar{x})^2 + (y^{(u)} - \bar{y})^2\}}{N-1}} \quad (3)$$

測位を完了したノードは、前回の推定位置と新たに得られた推定位置との距離、およびその間の経過時間をもとに推定移動速度 v_i を算出する。また、前回の推定位置からの移動距離が十分に小さい場合には自身の移動状態を“静止”，それ以外の場合は自身の移動状態を“移動”と推定する。移動状態が“移動”であるノードは、自身の推定移動速度 v_i に応じて、次に測位を実行するまでの時間間隔 $I_v(v_i)$ を調整する。 $I_v(v_i)$ は式 (4) により決定し、移動速度が速いノードほど高頻度で推定位置を更新する。

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

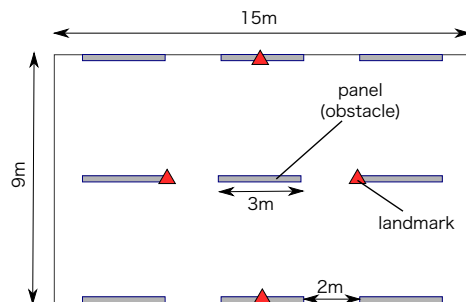


図2 想定環境 (ポスターセッション会場)
Fig. 2 Poster Session Scenario

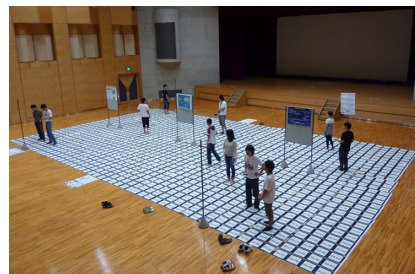


図3 フィールド実験
Fig. 3 Field Experiment

て決定する。また、測位回数の上限 I_{vmax} 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、移動状態が“静止”であるノードは、近隣ノードから移動を通知されるまでは測位の実行を抑制する。ただし、一定の期間 (I_s) にわたって近隣ノードから測距信号が受信されない場合には、例外的に測位を実行し、推定位置を更新する。

以上のプロセスにより、ネットワーク全体としての測位回数を抑制しながら、高精度な測位を実現することができる。

4. 予備実験

4.1 モビリティトレースの取得

実環境における歩行者の移動特性を調べるため、ポスターセッション会場を模した 9m × 15m の実験環境 (図2) を構成し、フィールド実験を行った。実験では会場内の 9 箇所にポスターパネルを設置し、計 12 箇所の展示場所でポスター発表が行われるとした。また、座標値を印字した 30cm 四方のマーカー 1,500 枚を図3のように床一面に配置した。上記の環境において、被験者がビデオカメラで足下のマーカーを撮影しながら移動することで、歩行者の位置トレースを取得した。

各被験者は発表者および聴衆として 5 分間、会場内で自由に行動する。発表者はポスターの展示場所で聴衆に対して説明を行い、聴衆は 12 箇所のポスター展示を巡回するとした。12 名の被験者の協力のもと、上記の実験を 8 回行い、72 通りの聴衆トレースと 24 通りの発表者トレースを取得した。



図4 Cricket Mote¹³⁾
Fig. 4 Cricket Mote¹³⁾

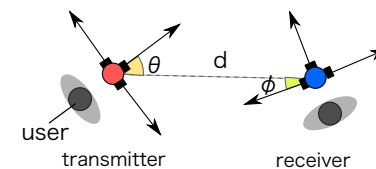


図5 ノードモデル
Fig. 5 Node Model

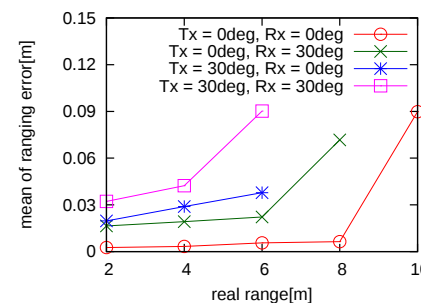


図6 平均測距誤差
Fig. 6 Average Ranging Error

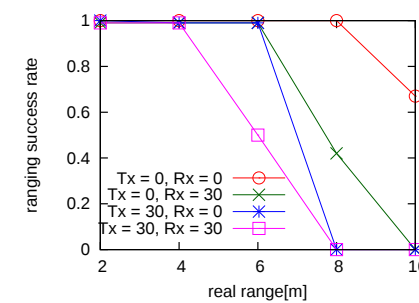


図7 測距成功率
Fig. 7 Ranging Success Rate

4.2 測距誤差モデルの構成

提案手法は測距手法とは独立であるため様々な測距手法が適用可能であるが、ここでは電波信号と超音波信号の TDoA に基づく測距法を想定し、Cricket Mote¹³⁾ (図4) を用いた実機実験に基づき測距誤差モデルを構成する。

超音波信号の発信デバイスおよび受信デバイスはともに指向性を持つため、図5のように、測距精度および測距成功率はノード間の距離 d に加えて測距信号の送信角 θ および受信角 ϕ に依存する。

まず、2つの Cricket Mote を静止状態で配置し、(d, θ, ϕ) の組み合わせを変化させて測距誤差の平均、分散、および測距成功率を評価した。ノード間の距離 d は 2m ~ 10m (増分 2m)、送信角 θ は $0^\circ \sim 45^\circ$ (増分 15°)、受信角 ϕ は $0^\circ \sim 45^\circ$ (増分 15°) の範囲でそれぞれ変化させ、すべての組み合わせで各 300 回の測距を行った。 θ, ϕ を 0° または 30° とした場合の平均測距誤差と測距成功率を図6~7に示す。ノード間の距離 d や測距信号の送受信角 θ, ϕ が大きい場合、測距信号の受信強度が小さくなるため測距誤差は増大するが、測距が成功した場合にはおおむね誤差 0.10m 以下の高精度な測距結果が得られて

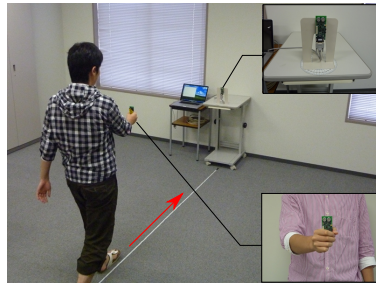


図 8 測距実験
Fig. 8 Ranging Experiment

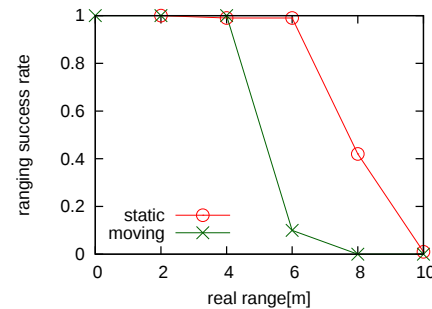


図 9 歩行時の測距成功率の低下
Fig. 9 Difference of Ranging Success Rate

いることが分かる。ただし、距離 d がある値より大きくなると、測距成功率は急激に低下する。また、測距可能な最大距離は信号の送受信角 θ , ϕ の増加に伴い小さくなる。

以上の実験結果に基づき、次のように測距誤差モデルを構成した。まず、ノード間の測距成功率 ρ はノード間の距離 d と測距信号の送受信角 θ , ϕ の関数として $\rho = \rho(d, \theta, \phi)$ で与えられるとする。また、測距が成功した場合、測距誤差は平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布に従うとし、 μ , σ はそれぞれ d , θ , ϕ の関数 $\mu = \mu(d, \theta, \phi)$, $\sigma = \sigma(d, \theta, \phi)$ により決定する。 μ , θ , ρ の関数値は上記の実機実験によって得られた測定値とし、測定点間は線形補完する。なお、ここでは各ノードが前方および左右に超音波の送受信デバイスを装備していると仮定していることから、後方以外の全方位に対し $0 < \theta, \phi < 45^\circ$ が成り立つ。

図 6～7 で示したように、測距精度や測距成功率は測距信号の送受信角に影響を受ける。このため、移動中のノードが測距を行う場合、歩行に伴う測距デバイスの指向方向のぶれにより測距成功率が低下する可能性がある。そこで、歩行に伴う測距成功率の低下を次の実験により評価した。まず、送信ノードを固定位置に設置し、50ms 間隔で繰り返し測距信号を発信する。一方、受信ノードは図 8 のように歩行者が手に保持し、送信ノードに向かって歩行する。送信ノードの送信角 θ を $0^\circ \sim 45^\circ$ (増分 15°) の間で変化させ、上記の実験を各 10 回行った。静止ノード同士で測距を行った場合と片方が移動ノードの場合の測距成功率の比較を図 9 に示す。同図は $\theta = 30^\circ$ の場合の結果である。歩行時には、測距デバイスの指向方向のぶれにより、静止時に比べて測距可能なレンジが 2m 程度短くなっている。測距信号の送信角 θ を変化させた場合にも、同様に測距可能レンジがおおむね 2m 程度短くなることを確認した。そこで、移動中のノードの測距誤差の平均、標準偏差、および測距成功率

は、静止ノード同士の測距実験により得られた関数 μ , σ , ρ に対し $\mu' = \mu(d + 2.0, \theta, \phi)$, $\sigma' = \sigma(d + 2.0, \theta, \phi)$, $\rho' = \rho(d + 2.0, \theta, \phi)$ により決定することとした。

5. 性能評価

予備実験により得られた歩行者の位置トレースおよび測距誤差モデルを用い、ネットワークシミュレータ QualNet によるシミュレーション実験を行った。本章では、実環境を想定したシナリオを用いた性能評価とその結果について述べる。また、ランドマークの配置や測距誤差が提案手法の性能に与える影響を分析する。

5.1 実環境を想定した性能評価

4 章の予備実験で取得した歩行者の位置トレースおよび実機実験に基づく測距誤差モデルを用いて、ポスターセッション会場における来場者ナビゲーションを想定したシミュレーション実験を行った。シミュレーションでは 4.1 節のフィールド実験と同じ、9m × 15m のポスターセッション会場を想定する。また、会場内には 9 箇所にポスターパネルが設置され、12 のポスター発表が行われているものとする。ノード数は 50 とし、モビリティとして発表者 12 名、聴衆 38 名の実トレースを適用する。ここでは、1 つのポスター発表を平均 3～4 名の聴衆が聞くと、ポスターセッション会場における典型的なノード密度を想定している。本実験で用いたモビリティデータのスナップショットを図 10 に示す。聴衆の多くはポスターの前で立ち止まって発表を聞いているため、ポスターの前方ではそれ以外の場所に比べてノード密度が高くなる。また、聴衆の数はポスターによって異なるため、会場内のノード密度には偏りがある。

来場者が保持するノードには、3.1 節で述べたように前方および左右方向に超音波の送受信モジュールが装備されており、後方以外の全方位に対して測距信号を送受信できる仮定とする。また、測距信号は端末を保持する人体および会場内のポスターパネルによって遮断されるとする。シミュレーションでは人体を各ノードから距離 30cm の位置にある長さ 30cm の線分でモデル化し、ノード間を結ぶ直線がこれらの線分と交差する場合にはノード間の距離によらず測距が失敗するとした。

会場内には、図 10 において三角形で示した 4 地点にランドマークを配置する。なお、ランドマークは壁やポスターパネル上などの高い位置に設置され、人体による測距信号の遮蔽の影響は受けけないものとする。

ノード間の測距誤差は、4.2 節で構成した測距誤差モデルに従うとする。すなわち、ノード間の距離 d および測距信号の送受信角 θ , ϕ に応じて平均 $\mu(d, \theta, \phi)$ 、標準偏差 $\sigma(d, \theta, \phi)$

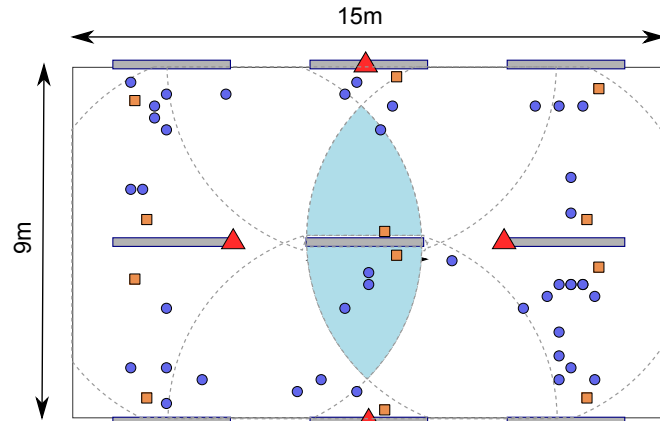


図 10 位置トレースのスナップショット
Fig. 10 A Snapshot of Real Traces

の正規分布に従う誤差が生じるものとし、ノード間の LOS が確保されている場合でも、 $(1 - \rho(d, \theta, \phi))$ の確率で測距が失敗するとした。図 10 において色付きで示した領域は、ノードの測距信号の到達距離を 5m とした場合に 3 つ以上のランドマークと測距を行うことができる領域を表している。この領域内では、ランドマークのみをアンカとして用いて測位を行うことができる。一方それ以外の領域では、静止中の近隣ノードの推定位置を位置基準点として利用する必要がある。

提案手法のパラメータの設定は次の通りである。移動中のノードの測位間隔の最大値は $I_{v_{max}} = 3.0$ 秒とする。また、静止中のノードも $I_s = 5.0$ 秒以内に 3 つ以上の周辺ノードから測距信号を受信できない場合には例外的に測位を実行する。アンカ選択アルゴリズムにおいてノード間の測距誤差を推定するためのパラメータ σ_0 (式 (2)) は 0.01 とした。また、測位の結果、位置誤差の推定値 σ_{p_i} が $\sigma_{p_{max}} = 1.0$ m よりも大きくなる場合には、その測位は失敗と判定した。

以上の環境で、提案手法の性能を既存の 2 つの協調型位置推定手法と比較した。1 つ目の手法 (*const.*) では、ノードの移動状態の検出を行わず、測位実行時にはすべての近隣ノードの推定位置を位置基準点として利用する。また、各ノードは移動状態によらず 2 秒一定間隔で繰り返し測位を実行する。それ以外の動作は提案手法と同様とする。2 つ目の手法 (*recursive*) は、DOLPHIN⁹⁾ の測位アルゴリズムに基づき、測位済みのノードがランダム

表 1 性能評価結果
Table 1 Simulation Results

	提案手法	const.	recursive
平均位置推定誤差	0.23m	0.85m	4.68m
平均トラッキング誤差	0.51m	0.95m	5.03m
測位成功率	0.95	0.99	1.00
平均測位間隔	5.49 秒	2.00 秒	2.35 秒
移動検出率	0.43	—	—

な順序で近隣ノードに対して測距信号を発信する。推定位置が未知のノードは、十分な数の測位済みノード (ここでは 3 つとする) との距離情報が得られた時点でただちに測位を実行し、以降は測位済みノードとして振る舞う。以上の動作を、すべてのノードが測位済みになるまで繰り返す。なお、DOLPHIN はセンサネットワーク等の固定端末を対象とした協調型手法であることから、ここでは各ノードの推定位置を 2 秒おきにリセットして繰り返し測位を実行することで、モバイル端末の位置をトラッキングした。

ノードが測位を実行する場合、近隣ノードが発信した測距信号の影響が完全に消えるのを待ってから測距を開始する必要がある。Cricket Mote を用いた測距実験の結果、超音波信号の到達距離はセンサの指向方向に対して最大 10m 程度であることが分かった。超音波信号が 1 m に進むのにかかる時間はおよそ 3ms であることから、測距信号の発信間隔は最小でも 30ms 程度とする必要がある。測位のためのメッセージ送受信によるオーバーヘッドを考慮すると、1 回の測距に必要な時間は 40ms ~ 50ms と考えられ、ノード数を 50 とした場合、すべてのノードが測距を完了するのにおよそ 2 秒の時間を要する。したがって、各ノードが一定間隔で測位を実行した場合の測位間隔の下限はおよそ 2 秒と考えられる。

提案手法と既存の協調型アプローチの性能の比較結果を表 1 に示す。平均位置推定誤差は、ノードの測位が実行されるたびにノードの位置誤差を評価し、その値を全ノード、全シミュレーション時間で平均した値である。一方、位置トラッキング誤差は、測位のタイミングとは独立に全ノードの推定位置と実際の位置との誤差を 1 秒おきに評価した値であり、各ノードの推定位置が移動に追従できているか (トラッキング性能) を表す指標となっている。この他に、測位成功率、平均測位間隔、およびアンカ選択アルゴリズムにより近隣ノードの 0.50m 以上の移動が測位ノードにより検出される割合 (移動検出率) を評価した。

recursive は、測位済みのノードが移動することにより、それらのノードが持つ大きな位置誤差が近隣ノードへ伝播し、位置推定誤差が著しく大きくなっている。また、それに伴

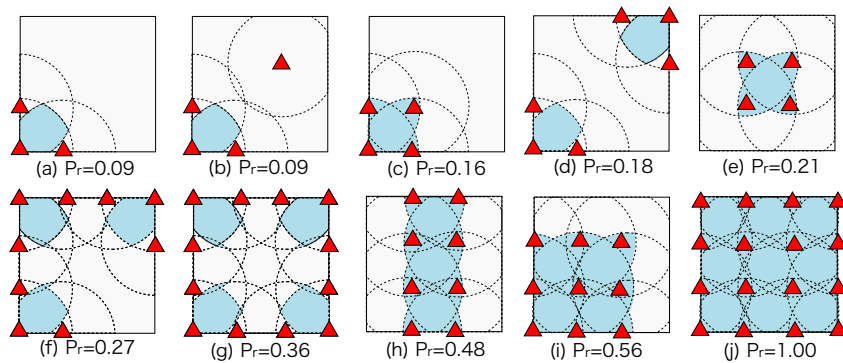


図 11 ランドマークの配置パターン
Fig. 11 Landmark Deployment Patterns

いトラッキング性能も悪化している。const. は、多数の近隣ノードを測位に利用することにより、移動したアンカによる測位精度への影響が相対的に小さくなるため、recursive に比べて測位精度が改善している。しかし一方で、2 秒一定間隔という高い頻度で測位を実行しているにも関わらず、依然として平均的に 1m 程度の誤差が生じている。これに対し、提案手法では、移動状態に基づくアンカ選択により位置推定誤差が const. に比べて 73%、recursive に比べて 95% 軽減されている。加えて、総測位回数はそれぞれ 64%、57% 減少している。以上の結果より、提案手法では既存の協調型手法に比べて測位効率を大幅に改善できることが示された。

5.2 ランドマークの配置パターンと測位性能

一般に、環境内に多数のランドマークを配置し、3 つ以上のランドマークとの測距が可能な領域の割合を増やすことで位置推定精度は向上すると考えられるが、それに伴いランドマークを配置するためのコストも大きくなる。本節では、ランドマークの設置数と測位精度の関係、および少数のランドマークで高い測位性能を得るための効果的なランドマーク配置を検討する。このため、15m × 15m のフィールドにおいてランドマークの設置数および配置パターンを図 11 のように変化させ、それぞれの環境における測位性能 (位置推定誤差、トラッキング誤差) を評価した。

本実験では、測距信号の到達距離は全方位に対し 6m とし、測距誤差はノード間の距離が $d(m)$ のとき平均 0、標準偏差 $\sigma = 0.01d$ の正規分布に従うとした。また、ノード数は 30 とし、提案手法のパラメータの設定は 5.1 節と同様とした。

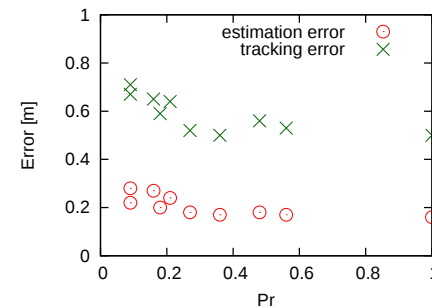


図 12 ランドマークの配置パターンと測位性能
Fig. 12 Impact of Landmark Pattern

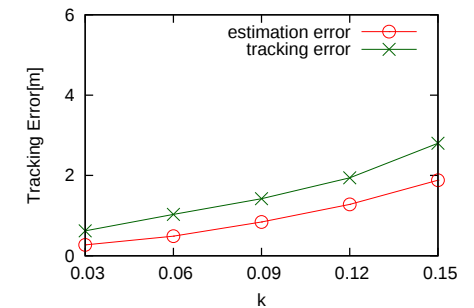


図 13 測距誤差の影響
Fig. 13 Impact of Range Measurement Error

ポスターセッション会場や美術館、スーパーマーケットといった屋内測位システムの利用環境では、一般に、歩行者は現在の位置に近接する場所 (展示物や売り場など) へ移動する傾向が強いと考えられる。そこで、各ノードのモビリティは次のような移動モデルに従うとする。対象領域を 3×3 のセルに分割し、各ノードは確率 0.7 で現在のセルの隣接セル、確率 0.3 でその他のセルを移動先として選択する。ノードは確率 p ($p = 0.1 \sim 0.9$) で移動先セル内のランダムな位置へ移動を開始し、確率 $(1 - p)$ でその場に 10 秒間静止する。

ここでは、ランドマークの配置パターンによる“測位の困難さ”の指標として、各ノードが全シミュレーション時間のうち 3 つ以上のランドマークとの測距が可能な領域 (図 11 の色付きの領域) 内に滞在している時間の割合 P_r を用いる。 P_r が大きいほどノードがランドマークとの直接測距により信頼性の高い測位を行える比率が高くなる。

P_r と平均位置推定誤差、平均位置トラッキング誤差との関係を図 12 に示す。ランドマークによる実効的なカバー領域が大きくなるほど、位置推定誤差および位置トラッキング誤差はともに小さくなる傾向にあるが、同図より、提案手法は $P_r = 0.09$ と低い場合にも平均位置誤差 0.21m、平均トラッキング誤差 0.71m という高い測位性能が実現されていることがわかる。さらに、 $P_r = 0.27$ (図 11 (f)) の場合には、 $P_r = 1.00$ の場合とほぼ同程度の精度が得られている。

また、図 11 の (a) と (b) では、3 つ以上のランドマークと測距を行える領域は同じであるが、(b) では右上の領域にランドマークを 1 つ追加することにより大半の領域で少なくとも 1 つのランドマークと測距を行うことが可能となり、(a) に比べて測位精度が改善している。このように、フィールド内の一部の領域で 3 つ以上のランドマークと測距可能な領域

を形成し、その他の領域へはランドマークを疎に配置することで、(j)のようにランドマークを密に配置することなく、効果的に測位精度を向上することができる。

5.3 測距誤差の影響

提案手法は測距技術とは独立であるため、前節で想定した電波と超音波の TDoA の他にもさまざまな測距法を適用可能である。そこで本節では、測距誤差が提案手法の測位性能に与える影響を評価する。測距信号の到達距離は全方位に対して 6m とし、測距誤差はノード間の距離が $d(\text{m})$ のとき平均 0、標準偏差 $\sigma = kd$ ($k = 0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15$) の正規分布に従うとした。 $k = 0.15$ の場合には、最大 1m 程度の測距誤差が生じることになる。提案手法における測距誤差推定のためのパラメータ σ_0 (式 (2)) は k と同じ値とした。ノード数やノードモビリティなどその他の環境設定は 5.2 節と同様とする。

k を変化させた場合の平均位置推定誤差と平均位置トラッキング誤差を図 13 に示す。同図より、測距誤差の増加に伴い、位置誤差およびトラッキング誤差がともに大きくなっていることが分かる。アンカ選択アルゴリズムにおいて測距誤差を推定するためのパラメータ σ_0 を大きくすると、式 (1) における測距誤差の推定値 σ_{r_j} や各ノードの位置誤差の推定値 σ_{p_j} も大きくなる。その結果、図 1 において測位ノードの存在領域を表す円環領域の幅が大きくなり、ノードの短い距離の移動が検出されにくくなるため、トラッキング性能が低下する。歩行者ナビゲーション等の一般的な屋内向け位置情報サービスでは、一般に誤差数 m 以内の測位精度が求められることから、提案手法で許容可能な測距誤差は最大 1m 程度と考えられる。

6. ま と め

本稿では、我々の提案する歩行者の移動特性を考慮した協調型位置推定手法の性能評価を行った。まず、予備実験として、ポスターセッション会場を想定したフィールド実験を実施し、発表者および聴衆の位置トレースを取得した。また、実機を用いた測距実験に基づき測距誤差モデルを構築した。これらの実トレースおよび測距誤差モデルを用い、実環境を想定した性能評価を行った。評価にあたっては、端末を保持する歩行者の人体やフィールド内の障害物による測距信号の遮蔽も考慮した。実験の結果、提案手法では従来手法に比べて測位頻度を 57% ~ 64% 軽減しつつ、位置推定精度を 73 ~ 95% 改善できることが分かった。この結果より、提案手法の高い測位効率が示された。また、ランドマークの配置パターンや測距誤差が測位精度へ与える影響についても評価を行い、効果的なランドマーク配置や他の測距手法の適用可能性を検討した。

今後の課題としては、提案手法を実機デバイス上に実装し、トラッキング性能や消費電力等を評価することを考えている。

参 考 文 献

- 1) Manandhar, D., Okano, K., Ishii, M., Torimoto, H., Kogure, S. and Maeda, H.: Development of Ultimate Seamless Positioning System Based on QZSS IMES, *Proc. ION GNSS 2008*, pp.1698–1705 (2008).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 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端末群の位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1, pp.197–208 (2011).
- 5) Ni, L.M., Liu, Y., Lau, Y.C. and Patil, A.P.: LANDMARC: indoor location sensing using active RFID, *Proc. PerCom 2003*, pp.407–415 (2003).
- 6) Wang, C., Wu, H. and Tzeng, N.F.: RFID-based 3-D positioning schemes, *Proc. INFOCOM 2007*, pp.1235–1243 (2007).
- 7) Youssef, M. and Agrawala, A.: The horus wlan location determination system, *Proc. MobiSys 2005*, pp.205–218 (2005).
- 8) Yin, J., Yang, Q. and Ni, L.M.: Learning Adaptive Temporal Radio Maps for Signal-Strength-Based Location Estimation, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.7, No.7, pp.869–883 (2008).
- 9) 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. UbiComp2004*, pp.347–365 (2004).
- 10) Li, M. and Liu, Y.: Rendered path: range-free localization in anisotropic sensor networks with holes, *Proc. MobiCom 2007*, pp.51–62 (2007).
- 11) Albowicz, J., Chen, A. and Zhang, L.: Recursive position estimation in sensor networks, *Proc. ICNP 2001*, pp.35–41 (2001).
- 12) Fujii, S., Nomura, T., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Real-time trajectory estimation in mobile ad hoc networks, *Proc. MSWiM 2009*, pp.163–172 (2009).
- 13) Priyantha, N., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The cricket location-support system, *Proc. MobiCom 2000*, pp.32–43 (2000).