

円周状対数正規分布を用いたNLOS環境下における 室内位置推定とその高速化に関する研究

九州大学大学院・芸術工学府 武尾 信之介
九州大学大学院・芸術工学研究院 大草 孝介
中央大学・理工学部 鎌倉 稔成

1 はじめに

近年, センサ技術やIoT技術の発達により, 人間一人ひとりの行動の記録が可能となり, その解析技術に注目が高まっている. 人の行動記録の中でも空間上の移動情報の解析は様々な分野で主要な役割を果たす. 空間上の位置推定技術としてはGlobal Positioning System(GPS)が普及しているが, その信号は屋内や地下施設には到達しないため, そういった環境下での位置推定に適用することは難しい. そのため屋内に設置した無線センサを用いた様々な位置推定技術が研究, 提案されているが, 屋外のように決定的なものは未だ確立されていない. そこで本研究では統計的なアプローチによる, 屋内位置推定のための数理モデルを提案することを目標とする.

2 先行研究

無線センサ(送信機と受信機)を用いて対象までの距離や角度を推定し, その値を使って測位対象の位置を推定する方法をレンジベース方式と呼ぶ. この方式には, TOA(Time Of Arrival:到達時間)方式やTDOA(Time Difference Of Arrival:到達時間差)方式がある. これらは電波の送受信にかかった時間や複数のセンサ間の電波受信時間の差から測位対象となるセンサまでの距離を計算する方式である. 基地局としてのセンサを最低3つ必要とし, またセンサ間の正確な時刻同期が必要であるが, 次にあげるRSSI方式に比べ精度よく位置を推定できる[3].

電波の信号強度は伝搬距離に応じて減衰していくという性質を利用して送受信機間の距離を推定する方法をRSSI(Received Signal Strength Indication:受信電波強度)方式と言う. TOAやTDOA方式に比べ安価な装置で実現できるが, 精度は大きく劣る[4].

基地局が発した電波を測位対象が受信する際に, その電波の到来角度を測定することで対象の位置を推定する方法をAOA(Angle Of Arrival:到来角度)方式と言う. 最低限必要な基地局は2つであり, 基地局と対象の間に障害物がない場合は正確に角度を計測でき高い精

度で位置を推定できるが, 逆に人や障害物の多い環境ではその精度を保てない. 装置は先に述べた方式のものに比べ複雑なものを要する[2].

これらの位置推定技術は屋内空間における避難経路の計画や, 店舗の動線管理, 設計など様々な用途に利用される[4].

本研究では統計モデルによるRSSI方式を利用した屋内位置推定の精度向上を目的とする. 既存の無線インフラの多くはRSSIを出力する機能を有しており, また他の方式に比べ簡易な装置で行えるため, 推定精度の課題を改善できれば実用コストの低さと合わせて大きなアドバンテージがあると考えられる.

3 提案手法

3.1 室内位置推定の課題

室内位置推定では屋外と違い, 遮蔽や, 壁や障害物からの反射波によって推定距離がノイズの影響を大きく受ける. ゆえに, 1つあるいは複数の基地局における推定距離がノイズの影響を受けている間は, 位置推定精度も大きく低下してしまう.

図1のように, どの基地局からの推定距離もノイズの影響があまり大きくないときは, 各基地局からの推定距離を半径とするそれぞれの円が正確に1点で交わらなくても, 最小二乗法によって精度よく測位対象の位置を推定することができる. しかし推定距離が大きくノイズの影響を受けたものが1つでもあれば, その瞬間の推定座標は実際の座標から大きくずれたものとなる.

この問題に際し, RSSI方式では精度を向上させるために, RSSIの事前計測を行い, 適用する環境やシーンごと, さらには基地局ごとに距離減衰モデルを用意するという対策が考えられている. しかしこれは, 実社会での実用を考えると作業コスト等の観点から現実的でないと言える.

事前計測を行わずにRSSI方式の位置推定精度を向上させるために, ノイズの影響のモデリングが重要とな

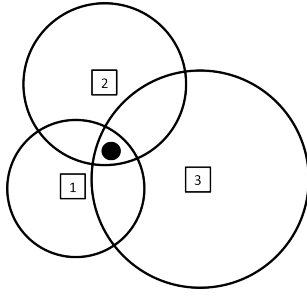


図 1: 各基地局からのノイズが小さい時

り, 本研究ではそれを考慮に入れて円周状分布による位置推定手法を提案する.

3.2 円周状分布による位置推定

円周状分布による位置推定では, 各基地局からの推定距離の分布に正の確率分布を仮定する. また, 三点測位の考え方と同様に, 方角が未知のことからその分布を円周状に拡張し, 測位対象の位置座標を推定する. 具体的には各基地局ごとに最尤推定された円周状の分布を重ね合わせた同時分布を考え, その確率が最大になるような座標が測位対象の位置座標であるとする (図 2).

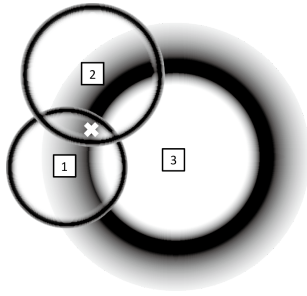


図 2: 円周状確率分布用いた位置推定

本研究では, 正の確率分布として対数正規分布を用いてこの手法を位置座標推定に適用した. 以下に対数正規分布を複数の基地局の分だけ重ね合わせた尤度関数の導出を示す.

基地局からの対象の存在確率の分布として, 次のような円周状の対数正規分布を考える.

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x^2 + y^2)} \exp \left\{ -\frac{(\log \sqrt{x^2 + y^2} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}.$$

μ, σ^2 はそれぞれ, 対数をとった距離データの平均, 分散である.

ここで i 番目の基地局の既知座標を (c_{i1}, c_{i2}) とすると,

そこからの距離の分布は,

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma((x - c_{i1})^2 + (y - c_{i2})^2)} \exp \left\{ -\frac{(\log \sqrt{(x - c_{i1})^2 + (y - c_{i2})^2} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

となり, 基地局の数を K とし, 各基地局から得られる値を (x_{ik}, y_{ik}) ($k = 1, \dots, K; i_k = 1, \dots, n_k$) とすると, 尤度関数は次のようになる.

$$L(\mu_1, \dots, \mu_K, \sigma_1, \dots, \sigma_K) = \prod_{i=1}^K \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i((x_{ij} - c_{i1})^2 + (y_{ij} - c_{i2})^2)} \exp \left\{ -\frac{(\log \sqrt{(x_{ij} - c_{i1})^2 + (y_{ij} - c_{i2})^2} - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\}.$$

真の位置を (α, β) とすれば, 位置 (α, β) における同時確率密度は,

$$h(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^K g_i(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i((\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2)} \exp \left\{ -\frac{(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\}$$

となるので, $h(\alpha, \beta)$ が最大になるような $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ を推定座標とする [1]. しかし, この推定は計算時間が膨大となるため, 本研究では, 次節でその高速化をはかる.

4 座標推定の高速化

実際には対数尤度関数 $\ell(\alpha, \beta) = \log h(\alpha, \beta)$ を最大にする $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ を計算するのだが, 以下に示すニュートン法を用いることで, 最小二乗法による位置推定と比べても実用上では問題のない速度で推定が完了することを確認している.

$$\ell(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^K \left\{ -\sqrt{2\pi}\sigma_i((\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2) - \frac{(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\}$$

極値で最大となるので α, β で偏微分する.

$$\frac{\partial \ell}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^K \frac{\alpha - c_{i1}}{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \sum_{i=1}^K \frac{(\alpha - c_{i1})(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)}{\sigma_i^2((\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2)}$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^K \frac{\beta - c_{i2}}{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \sum_{i=1}^K \frac{(\beta - c_{i2})(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)}{\sigma_i^2((\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2)}$$

$\frac{\partial \ell}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial \ell}{\partial \beta} = 0$ とすると, それぞれ

$$2K\alpha - 2 \sum_{i=1}^K c_{i1} + \sum_{i=1}^K \frac{(\alpha - c_{i1})(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)}{\sigma_i^2} = 0 \quad (1)$$

$$2K\beta - 2 \sum_{i=1}^K c_{i2} + \sum_{i=1}^K \frac{(\beta - c_{i2})(\log \sqrt{(\alpha - c_{i1})^2 + (\beta - c_{i2})^2} - \mu_i)}{\sigma_i^2} = 0 \quad (2)$$

となる.

方程式 (1), (2) の左辺をそれぞれ $g_1(\alpha, \beta), g_2(\alpha, \beta)$ とすると, ニュートン法による推定座標 \mathbf{x}_{n+1} は次のように表される.

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - \mathbf{J}(\mathbf{x}_n)^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x}_n)$$

ただし,

$$\mathbf{x}_n = \begin{pmatrix} \alpha_n \\ \beta_n \end{pmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}_n) = \begin{pmatrix} g_1(\mathbf{x}_n) \\ g_2(\mathbf{x}_n) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_n) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial g_1}{\partial \beta} \\ \frac{\partial g_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial g_2}{\partial \beta} \end{pmatrix}$$

5 シミュレーション

シミュレーションによる提案手法の評価については当日報告する.

6 実データへの適用

6.1 実験方法

本研究の手法の評価のために, $10[m] \times 8[m]$ 室内環境において RSSI センサ (Pozyx Labs 社) を用いて, サンプリングレート 6Hz で距離データを測る実験を行い, 円

周状対数正規分布と精度比較のため円周状ワイブル分布と最小二乗法を適用して位置座標の推定を行なった. 本節では次の 4 つの状況での実験結果を示していく.

- ① LOS 環境下で測位対象が静止している場合
- ② NLOS 環境下で測位対象が静止している場合
- ③ LOS 環境下で測位対象が移動している場合
- ④ NLOS 環境下で測位対象が移動している場合

LOS(Line of Sight) とは測位対象と基地局の間の見通しがあることで, 見通しがないことを NLOS(Non-Line of sight) という. また今回の実験は基地局を 6 つ設置して行なった.

①では室内に縦横 2m 間隔で 20 の地点を定め, 各地点で 5 分間静止している間の各基地局との距離データを取得した. ②は 2 つの基地局の目の前に障害物を設置し, それ以外は①と同じ条件で同様のことを行なった. ③では部屋的前方から後方へジグザグに部屋を横断しながら歩き, その間の距離データを取得した. ④は②と同じ 2 つの基地局の目の前に障害物を設置し, それ以外は③と同じ条件で同様のことを行なった.

6.2 結果

円周状対数正規分布と円周状ワイブル分布, 最小二乗法それぞれによる推定座標と真の座標からの誤差を 4 つの状況それぞれにおいて示す. 以下の図は, それぞれの方法による静止地点 20 及び移動中の推定座標の真値からの距離の箱ひげ図であり, 単位は [mm] である.

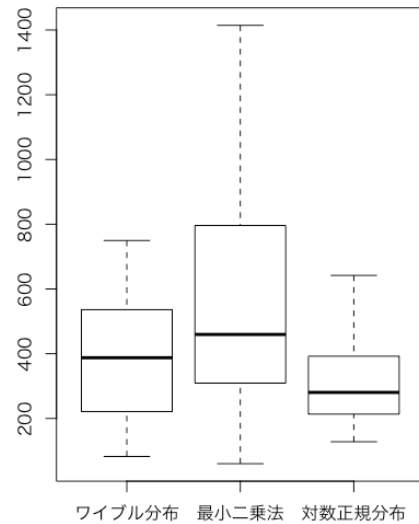


図 3: ①静止 LOS 環境

LOS 環境下の静止実験では, 円周状の確率分布による手法の方が最小二乗法より高い精度で対象位置を推定できており, その中でも特に円周状対数正規分布によ

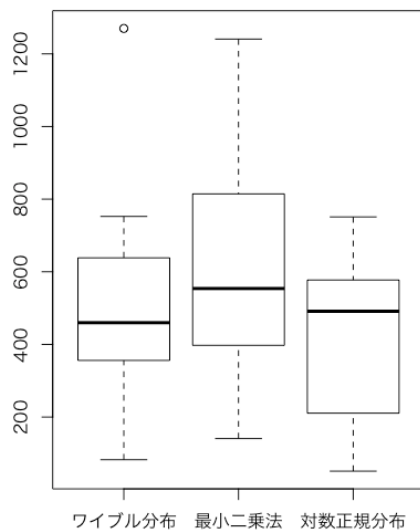


図 4: ②静止 NLOS 環境

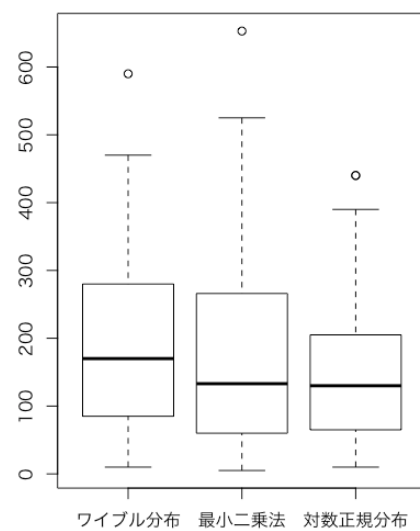


図 6: ④移動 NLOS 環境

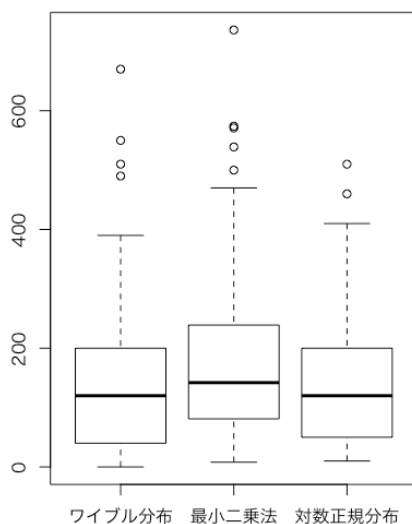


図 5: ③移動 LOS 環境

る推定が最も良い精度で推定できている (図 3). NLOS 環境下の静止実験では, 全体的に推定精度が下がるが, 円周状対数正規分布による推定は高い精度を維持できていることが分かる (図 4). 図 5 は LOS 環境下で移動中の 85 地点分の推定座標と真の経路との距離をそれぞれ箱ひげ図に表したものである. 全体的な精度の差はわずかであるが, 円周状確率分布による推定がより優れていることが分かる.

図 6 は NLOS 環境下で移動中の 85 地点分の推定座標と真の経路との距離をそれぞれ箱ひげ図に表したものである. 円周状対数正規分布が 3 手法の中では精度よく推定できていることが分かる.

7 おわりに

提案手法により既存の最小二乗法による位置推定より, 円周状対数正規分布を利用した位置推定方法の方が安定して精度良く位置座標を推定することが可能となった. 提案手法の特性から, もっと複雑な NLOS 環境においては最小二乗法による推定の精度がさらに落ち, 円周状対数正規分布による位置推定の有用性がより高くなるものと予測されるため, 今後の方針としてはまず, より複雑で実際の利用シーンに近い環境を再現したシミュレーションや, 実際にこういった条件で実験を行い位置推定結果の解析・評価を行なっていく予定である.

参考文献

- [1] Okusa, K. & Kamakura, T. (2015). Indoor Location Estimation based on the RSS method using Radial Log-normal Distribution. *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI2015)*, pp.29-34.
- [2] Niculescu, D. & Nath, B. (2003). Ad hoc positioning system (APS) using AOA. *INFOCOM*, **3**, pp.1734-1743.
- [3] He, J., Geng, Y. & Pahlavan, K. (2012). Modeling indoor TOA ranging error for body mounted sensors. *IEEE Int'l Symp. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp.682 - 686.
- [4] Kaemarungsi, K. & Krishnamurthy, P. (2004). Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting. *IEEE Conf. In Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, pp.14 - 23.