

徘徊高齢者位置推定のための 人体遮蔽を考慮した電波強度のモデル化

Modeling of Radio Wave strength Considering Human Body Occlusion
for Position Estimation of Aged wanderer

福本 加奈恵*¹
Fukumoto Kanae

白松 俊*¹
Shiramatsu Shun

岩田 彰*¹
Iwata Akira

永井 明彦*²
Nagai Akihiko

クグレ マウリシオ*¹
Kugler Mauricio

*¹名古屋工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻

*²筑波大学

Department of Computer Science, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

University of Tsukuba

Due to the aging of the population, the necessity of technologies to find aged wanderers has been increased. This study aims to develop a method for estimating position of aged wanderer based on RSSI values of BLE beacon carried by an aged wanderer. Our method can track walking wanderer by integrating RSSI observations and Particle Filter. However, attenuation of RSSI because of occlusion of beacon by human body has a negative influence on the accuracy of the localization. In this paper, we deal with modeling of radio strength considering human body occlusion.

1. はじめに

近年、高齢化に伴う認知症患者の増加が社会問題となっている。認知症の症状の一つとして徘徊行動が挙げられる。本研究グループではこれまで、Bluetooth Low Energy(BLE)のビーコンを徘徊高齢者に持たせることで見守るシステムを開発し、社会実験を行ってきた[永井 15]。白松らの手法[白松 16]は徘徊高齢者が所持するBLEビーコン(発信機)と探索者が所持するスマートフォン(受信機)は各1つずつという状況を想定している。そのため、探索者が移動するに連れて多地点で電波強度を計測し、事前確率分布に基づいて多地点の計測結果を確率的に統合するというアプローチをとっている。しかし、探索対象の徘徊高齢者が止まっていると仮定しているため、高齢者が移動している場合の探索が困難であった。そこで、パーティクルフィルタを用いて高齢者の移動を考慮した場合の追跡を行ってきた。しかし、ビーコンが身体によって遮蔽されてしまうと、ビーコンが検知できなかつたり、RSSI値が取得できなくても、予め計算しておいたRSSI値ごとの距離の分布から予想されるRSSI値とは異なる値である問題が発生した。そこで、本稿では人体遮蔽を考慮した確率モデルの作成について検討する。

2. パーティクルフィルタを用いた追跡手法

まずはパーティクルフィルタを用いた追跡手法とその実験結果について説明する。

2.1 従来手法

まずは白松らによる従来手法によるビーコンの存在確率の計算方法を説明する。RSSI値の非安定性を補うために、RSSI値と距離の関係をあらかじめ計測し、確率分布を計算しておく。距離 $d[m]$ のときRSSI値 $r[dBm]$ が観測された回数を $\text{freq}(r, d)$ とすると、距離の確率 $P_r(d)$ は以下の式(1)で算出できる。

$$P_r(d) = \frac{\text{freq}(r, d)}{\sum_d \text{freq}(r, d)} \quad (1)$$

ただし、本研究では十分な測定回数を確保できなかったため平滑化(smoothing)が必要となる。また、確率の積算処理で1連絡先: 福本加奈恵, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学つくり領域 白松研究室

度でも確率0がまじると最終的な値も0となってしまう正しい値を算出できないゼロ頻度問題[Chen 99]に対応する必要もある。よって、RSSI値が1[dBm]ずれた場合の頻度を0.5の重みで加味することで測定回数の少なさを補い、すべての $\text{freq}(r, d)$ に1を足すラプラス平滑化を用いることでゼロ頻度問題に対応した。

2.2 確率的位置推定

提案手法では、マップを1m四方のグリッドに分割し、得られた事前分布を用いて各グリッドにおけるビーコンの存在確率を算出する。探索者の移動に連れて、一定時間間隔 Δt ごとに m 回まで計測する地点を $[q_i]_{i=0,1,2,\dots,m}$ とおき、各計測地点でのRSSI値を $[r_i]_{i=0,1,2,\dots,m}$ 、計測地点 q_i からグリッド (x, y) までの距離を $d(q_i, (x, y))$ とおく。RSSI値が r_i のとき距離 d である確率を $p_{r_i}(d)$ とすると、各グリッドにおけるビーコンの存在確率は以下の式(2)で算出できる。

$$p((x, y)|[r_i]) = \frac{\prod_{i=0}^m \alpha^{m-i} p(d(q_i, (x, y))|r_i)}{\sum_{x,y} \prod_{i=0}^m \alpha^{m-i} p(d(q_i, (x, y))|r_i)} \quad (2)$$

このとき α は減衰率を表す。今回は $\alpha = 1$ とした。

2.3 パーティクルフィルタ

パーティクルフィルタを実装するにあたり、移動モデルと尤度関数を設計する必要がある。本研究では、移動モデルは等速直線運動を仮定して、ビーコンの存在確率の時系列変化を延長する形で定義する。尤度関数には従来手法で計算したビーコンの存在確率を用いる。

まずは移動モデルの定義を説明する。各パーティクルについて状態ベクトルはその位置 (x, y) と各軸方向の速度 (u, v) の4次元で与えられる。パーティクルの移動モデルとして等速直線運動を与えた場合、以下のような行列で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、電波強度の観測結果から得られたビーコンの存在確率 $p((x, y)|[r_i])$ を考慮する。そのために最小二乗法を用いて最新の速度ベクトルを推定し、時刻 t のパーティクルの速度ベクトル

(u_t, v_t) を補正する。最新の速度ベクトルの推定について説明する。時刻 $t = i$ の高齢者の移動先を (x_i, y_i) と表す。対象者が等速直線運動をしていると仮定すると、 $x_t = a_{x,t}t + b_{x,t}, y_t = a_{y,t}t + b_{y,t}$ という直線を引くことができる。時刻 $t = i - n$ から $t = i - 1$ までのビーコンの存在確率の重心 (x_i, y_i) を用いた最小二乗法により、パラメータ $a_{x,t}, b_{x,t}, a_{y,t}, b_{y,t}$ を決定する。 $a_{x,t}, b_{x,t}$ は $J = \sum_{j=i-n}^{i-1} (x_j - (a_{x,t}j + b_{x,t}))^2$ を最小化することによって求められる。 $a_{y,t}, b_{y,t}$ も同様に求めることができる。得られた最新の速度ベクトル $(a_{x,t}, a_{y,t})$ とパーティクルの速度ベクトルの (u_t, v_t) を合成したものを新たに時刻 t のパーティクルの速度とする。つまり、 $(u_t, v_t) = (\beta u_t + (1 - \beta)a_{x,t}, \beta v_t + (1 - \beta)a_{y,t})$ と表すことができ、式 (3) は以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} + (1 - \beta) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{x,t} \\ b_{y,t} \end{pmatrix} \quad (4)$$

次に尤度関数の定義を説明する。尤度関数には従来手法で計算されるグリッドごとのビーコンの存在確率 $p((x, y)|[r_i])$ を用いた。本来は、時刻 $t = i$ にビーコンが存在すると予測されるグリッド $(a_{x,t}i + b_{x,t}, a_{y,t}i + b_{y,t})$ を平均ベクトルとしたガウス分布 $f_i(x, y)$ と $p((x, y)|[r_i])$ の積を用いる予定であったが、実装が困難であったため、今回は $p((x, y)|[r_i])$ のみを尤度関数とした。また、 $f_i(x, y)$ を用いる場合は、 $f_i(x, y)$ の標準偏差 σ は、直前の位置推定の精度を反映するために、 $g_{i-1}(x, y)$ の分散に比例する値を用いる。

尤度関数から計算される各パーティクルの重み付き平均からビーコンの位置を推定し、本来のビーコンの位置との距離を測位誤差とする。本研究ではこの測位誤差を推定精度の指標として用いる。

2.4 確率分布の計測

愛知県名古屋市の管理する鶴舞公園の陸上競技場で確率分布用のデータを取得した。陸上競技場には障害物のたぐいがほとんどなく、自由空間に近いといえる。また、ビーコンは、前方に指向性を持つものを使用した。これは、ビーコンを首から下げて運用することを考えた際に、後方への電波は人体に吸収されるという仮定から開発されたアンテナにより、前方への指向性を持つというものである。ビーコンをラグビー競技用のポールに、地面から約 1.2m の高さに固定し、固定した地点から最大 50m 離れた地点まで 2m ごとに 100 回ずつ RSSI 値を計測した。この実験から得られた確率分布を図 1 に示す。この確率分布をもとに、位置推定実験を行う。

2.5 位置推定実験

同じく鶴舞公園の陸上競技場で位置推定実験を行った。実験には、ビーコン所持者と探索者が 50m 離れたところから向かい合って出発し、25m 地点ですれ違うルートを用いた。また、ビーコン所持者と探索者の歩行経路の間隔は 2m とした。計測した RSSI 値と、探索者の位置情報を元に、パーティクルフィルタを用いてビーコンの位置を推定する。データは各 5 回分計測し、それぞれについて、5 回パーティクルフィルタを適用した。試行 25 回の測位誤差の平均を評価値として用いる。

式 (3) の β を 0.8、パーティクル数を 500 に設定し、位置推定を行った結果を図 2 に示す。

図 2 を見ると、ビーコン所持者と探索者がすれ違う $t = 25$ 付近で測位誤差が最小 2m となっていることがわかる。しかし、すれ違った後で急激に測位誤差が大きくなっている。この

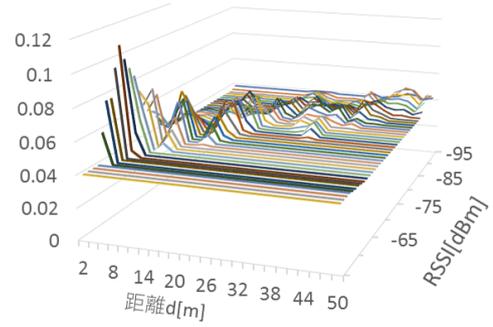


図 1: 平滑化された確率分布

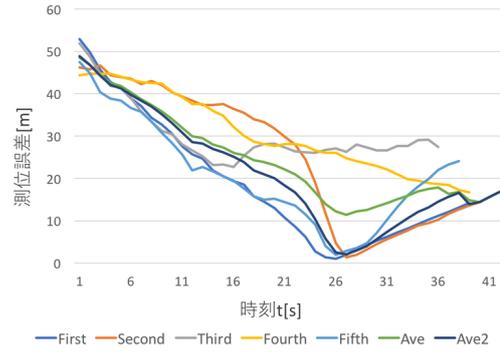


図 2: 測位誤差

実験に用いたデータを見てみると、 $t = 30$ 以降では RSSI 値が取得できていないことがわかった。そこで、 $t = 30$ 以降で RSSI 値が取得できないのは人体でビーコンが遮蔽されたためであると仮定し、人体遮蔽を考慮した確率モデルを作成することにした。

3. 人体遮蔽を考慮した確率モデル

ビーコンが人体によって遮蔽されると、RSSI 値が取得できない、また、RSSI 値が取得できている場合でも、あらかじめ計測した確率分布から予測される RSSI 値と異なっていると仮定し、それに対応するための確率モデルを考える。図 3 のように、ビーコン所持者の正面を $\theta = 0$ とし、45 度ごとに RSSI 値を測定した後、 $p(d, \theta|r)$ を計算する。

図 4 に距離と角度ごとの RSSI 値の平均を示す。このとき、

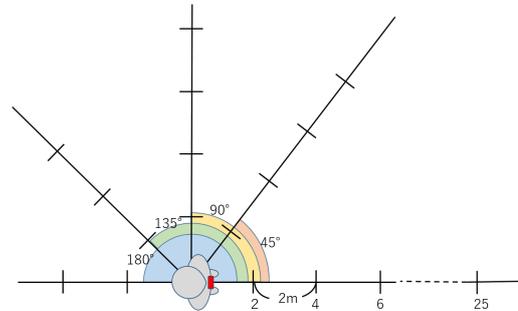


図 3: 人体遮蔽を考慮した確率モデル

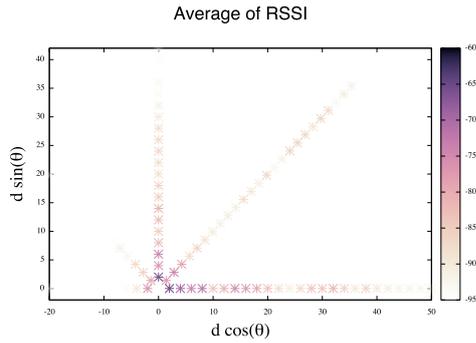


図 4: 距離と角度ごとの RSSI 値の平均

ビーコン所持者は原点に x 軸の正の向きに立っている。図 4 をみると、探索者が正面にいる $\theta = 0$ のときだけでなく、45 度と 90 度傾いているときでも RSSI 値が取得できていることがわかる。これは、ビーコンが人体で完全には遮蔽されていないためであると考えられる。

$\theta = 0, 45, 90, 135, 180$ のときの RSSI 値ごとの距離の分布を図 5 に示す。5a, 5b, 5c をみると、取得した RSSI 値が大きいつきは、より角度の大きい $\theta = 90$ のときよりも、 $\theta = 45$ のときの方が、確率が小さいことがわかる。これは、 $\theta = 0, 45, 90$ ではビーコンが人体で遮蔽されておらず、明確に差がでなかったためであると考えられる。ビーコンが人体で遮蔽される $\theta = 135, 180$ のときは 10m 付近までしか RSSI 値が測定できず、また、遮蔽されていないときよりも RSSI 値から予測される距離が小さくなっていることがわかる。このことから、ビーコンの電波は人体遮蔽による影響を受けると考えられる。

また、今回計測していない角度を補うために、確率分布をモデル化する必要がある。図 4 を見ると、RSSI 値を取得できる最大の距離は、角度が大きくなるごとに短くなっていることがわかる。また、各角度の最大距離を結ぶと、カージオイドによって表される曲線に類似している。実験には指向性アンテナを使用しており、カージオイド特性を持つという考え方は妥当である。そこで、RSSI 値を取得できる最大距離をカージオイドで近似できると考えられるが、関数で表すためには、もう少し角度を細かく設定して、データを取得する必要がある。

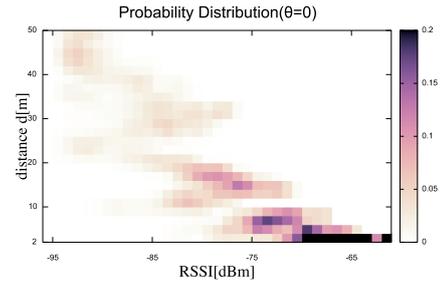
4. まとめ

本稿では、移動する徘徊高齢者をパーティクルフィルタを用いて追跡する手法について説明し、実験を行った。その結果、測位誤差は最接近時付近で平均 12m 最小で 2m となり、声掛けの手がかりになると示唆された。

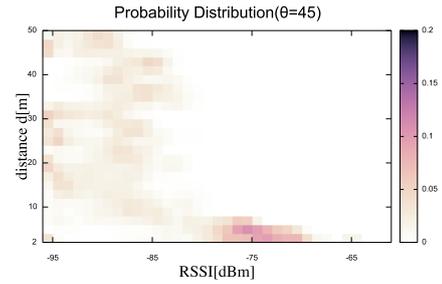
今後は距離に加えて角度を考慮した $p((d, \theta)|r)$ を用いてパーティクルフィルタを実装し、すれ違った後に測位誤差が大きくなる問題に対応する予定である。また、歩きながら RSSI 値を測定した場合と、立ち止まって測定した場合とでは、同じ距離でも RSSI 値が異なる問題について、距離の二乗に反比例するという理論値からのばらつきが、対数正規分布あるいはレイリー分布などに従うと仮定することにより、測位精度の改善を図る予定である。

謝辞

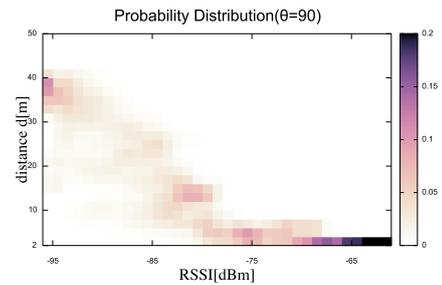
本研究は、総務省 SCOPE 地域 ICT 振興型研究開発、および、JSPS 科研費 (25870321) の支援を受けた。



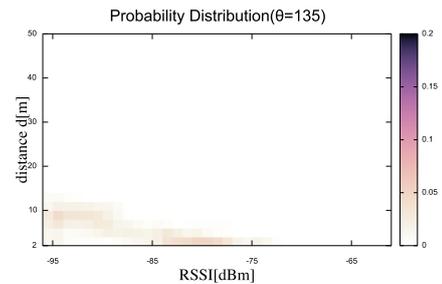
(a) $\theta = 0$



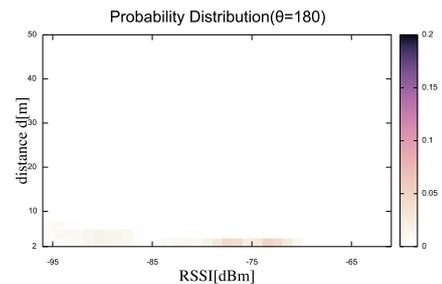
(b) $\theta = 45$



(c) $\theta = 90$



(d) $\theta = 135$



(e) $\theta = 180$

図 5: 人体遮蔽を考慮した確率分布

参考文献

- [永井 15] 永井 他: “BLE センサと国内普及 5,700 万台のスマートフォンと利用した認知症高齢者見守りシステムの提案”, 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015.
- [白松 16] 白松 他: “徘徊高齢者捜査のための BLE ビーコンの電波強度分布を用いた位置推定手法, IPSJ SJG-ASD”, 2016-ASD-4(2), 2016.
- [Chen 99] Chen, Stanley F., and Joshua Goodman: “An empirical study of smoothing techniques for language modeling”, *Computer Speech & Language* 13(4), pp. 359-393, 1999.