

研究室環境下における ZigBee を用いた位置測位

辻 順平^{†1,†3} 川村 秀憲^{†1,†3} 鈴木 恵二^{†1,†3}
池田 剛^{†2,†3} 幸島 明男^{†2,†3} 車谷 浩一^{†2,†3}

大型商業施設などの屋内空間における，物品・従業員管理，顧客の動線情報の獲得を目的として，センサネットワークにおける移動センサ測位技術が注目を集めている．本研究では，低コスト・低消費電力を特徴とした ZigBee の RSSI に基づく測位手法を用いて，実環境での精度が保証された測位システム構築に向け，その課題を明らかにすることを目的とする．研究室における端末測位環境を構築し，環境を自由に移動する人の測位実験を行った．

Localization in Real Laboratory Floor Using ZigBee

JUNPEI TSUJI,^{†1,†3} HIDENORI KAWAMURA,^{†1,†3}
KEIJI SUZUKI,^{†1,†3} TAKESHI IKEDA,^{†2,†3} AKIO SASHIMA^{†2,†3}
and KOICHI KURUMATANI^{†2,†3}

Mobile sensor localization technologies attracts attention for the purpose of goods management in large indoor commercial spaces etc. This study uses ZigBee RSSI for localization and aims to clear up the problems on localization using this method in real indoor spaces. This study made a localization system in a laboratory floor and tried to localize a mobile sensor in this floor.

†1 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
†2 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST
†3 戦略的創造研究推進事業
Core Research for Evolutional Science and Technology, CREST

1. はじめに

近年，センサネットワークが注目を集めており，センサネットワークを実環境で活用するにあたって，センサの位置情報の重要性が主張されている¹⁾²⁾．

センサの位置取得を考えたとき，センサが環境に固定されている場合は，事前の計測により位置情報を得ることができるが，センサの位置が移動する場合にはその方法は使うことができない．

ここで，移動センサをリアルタイムに位置取得できる技術は，下記のようなサービス実現に役立つと考えられる．たとえば，センサを子供に持たせることで，子供が迷子になった際，親が手元の携帯電話からインターネットを介してサーバに問い合わせると，子供の位置が取得できるサービス（迷子探索）．利用者が SOS 信号を発信した際に，警備員・従業員がその利用者の位置を取得し，その場所に急行できるサービス．利用者の位置が集中している地点を，他の利用者にお知らせするサービス（混雑通知）．これらのサービスには，リモートで利用者・従業員等の位置情報が逐次管理されていることが必要となる．

こうしたサービス実現のための，屋内センサネットワークに対する測位手法としては，位置が既知である環境に固定されたセンサを設置し，それらがセンシングした情報を元に，未知の移動センサの測位を行う手法が主に研究されている．

ここでセンシング情報として，到達時間差 (TDOA) を用いた測位方式が提案されている．この手法を用いた研究の中には，高い測位性能を報告しているものもあるが，環境に固定されたセンサ間の精度の高い時刻同期が必要であり，デバイス拡張のコストが高くなってしまいうという問題がある．

一方で，受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を用いた手法が考えられる．通信規格の中には，通信の品質維持のため信号強度を計測する機能が標準装備されているものもあり，測位利用のためにデバイスの拡張をする必要がないというメリットがある．よって，低コストが求められるセンサネットワークに適した測位手法となりうる．

RSSI を用いた測位手法は，最尤法を用いる手法³⁾，パーティクルフィルタを用いる手法⁴⁾⁻⁶⁾ などさまざま研究されている．しかしながら，屋内においては什器や壁などの影響でマルチパスが伴い，測位結果には誤差が含まれる中で，サービスに十分な精度で測位できる必要がある．また，その実現のためにどういった課題が存在するかは明らかではない．

本研究では，前述のサービスを適用する実環境における，十分な精度で測位可能な測位システム構築にあたって生じる課題を明らかにすることを目的とする．研究室における端末測

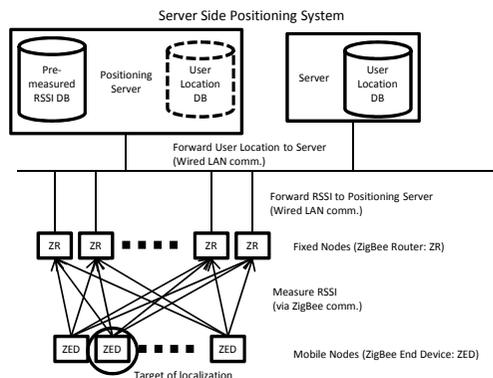


図 1 system components

位環境を構築し、環境を生活する人の測位実験を行った。

2. 測位システム

2.1 システム構成

本節では、位置が既知である環境に固定された ZigBee センサ（以下、ZigBee ルータ）と RSSI 計測を用いて、屋内の人の位置を測定するシステムの構成について述べる。このとき利用者は、屋内を移動する ZigBee センサ（以下、ZigBee エンドデバイス）を持っており、ZigBee エンドデバイスは ZigBee ルータと通信できることを前提とする。提案システムは、たとえば迷子探索の例で言うと、子供たちは ZigBee エンドデバイスを包んだぬいぐるみやおもちゃを持っており、その ZigBee エンドデバイスが環境に設置してある ZigBee ルータと通信を行う。それらの通信の RSSI を計測することで、その情報を基に ZigBee エンドデバイスの位置（すなわち子供の位置）を取得できる。また、親が子供の位置を探索する際には、携帯電話を介して環境下に置かれたサーバへアクセスし、子供の位置情報を取得できるものである。

以上を表わしたものが Fig.1 である。

(1) ZigBee エンドデバイスは ZigBee ルータに対して、RSSI の計測を要求するパケットを一定間隔で一斉送信する。

(2) ZigBee ルータは、ZigBee エンドデバイスによって送信されたパケットを受け取り、そ

の RSSI を計測する。

(3) ZigBee ルータは計測した RSSI データを、Ethernet を介してサーバへ転送する。

(4) サーバはそれぞれの RSSI データを収集し、データを統合して ZigBee エンドデバイスの位置を計算する（位置計算に用いるアルゴリズムは後述する）。

(5) サーバは測位結果をデータベースへ保存する。

これらの処理によりサーバにアクセスすることで、測位結果を受け取り表示することができる。

ルータノードにパケットを送信させなかったのは、そうした場合、ルータノード間で送信時刻の同期が必要となるためである。本システムのように移動ノードにパケットを一斉送信させることで、各ルータノードのパケット受信のタイミングを同期させることができる。

システム構築用の通信モジュールとして、ZigBee エンドデバイスには Telegesis 社の ETRX2USB (Fig. 2 左) を、ZigBee ルータには ETRX2 EAP-E (Fig. 2 右) を用いた。実験では、ETRX2 EAP-E に固定 IP を振って Ethernet 経由でデータを取得できるようにした。



図 2 ZigBee modules: ETRX2USB (left), ETRX2 EAP-E(right)

3. 測位計算

本節では、RSSI の計測データに基づいて、移動ノードを持った歩行者の測位計算を考える。測位計算の目標は、3次元上の位置を精度良く推定することである。RSSI を用いた測位計算には、測位環境において RSSI がどのように分布するか、を表す観測モデルが必要となる。この観測モデルのために、環境における RSSI の事前計測が必要となるが、測位計算の次元を d としたとき、 d 乗のオーダで必要となる計測点数が増えることになる。そのため、多次元の RSSI 計測には困難が伴う。

たとえば、廊下を移動する歩行者を想定した場合、歩行者は廊下の中央付近を移動すると

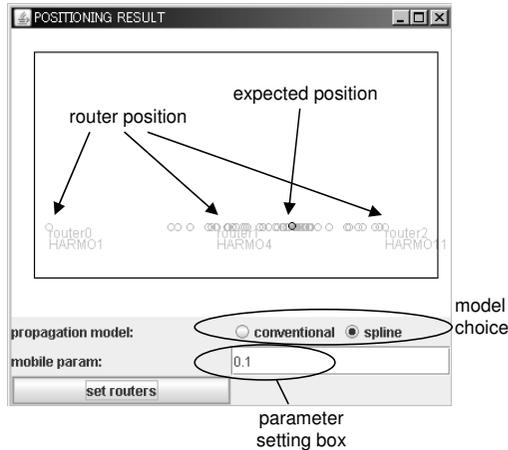


図 3 display for positioning results

考えられる．この場合，計算結果を 1 次元に限定しても差し支えないといえる．

しかしながら，廊下の壁付近を移動したり，広い部屋などのおよそ 1 次元に単純化できない屋内環境を歩行者が移動する可能性も考えられる．この際，計測に用いた軸と異なる軸での RSSI 変化が，測位にとって重要となることが想定できる．こうした問題に対しては，計測範囲を多次元に拡張する必要があるが，今回は扱わないことにする．

次節以降では，パーティクルフィルタを用いた，RSSI に基づく 1 次元座標の推定手法について述べることにする．

3.1 パーティクルフィルタ

ここで，歩行者の位置を $x(t)$ としたとき， $x(t)$ はマルコフ過程にしたがって，確率的に決定されると考えられる．こうしたマルコフ過程に基づく状態 $x(t)$ の推定手法として，パーティクルフィルタが提案されている⁷⁾．

一般的には，時刻 t おける状態ベクトルを x_t として，状態遷移のモデルは式 (1) で表現することができる．

$$x_t = F(x_{t-1}, v_t) \quad (1)$$

また，観測値ベクトルを y_t として，観測値のモデルは式 (2) で表現できる．

$$y_t = G(x_t, w_t) \quad (2)$$

ここで， v はシステムノイズ， w は観測ノイズを表す確率変数ベクトルである．

パーティクルフィルタは，式 (1)(2) で表されるシステムに対し，観測値 y_t から状態 x_t を推定する手法の 1 つである．

状態 x_t の推定は確率密度によって表される．パーティクルフィルタでは，確率密度の分布は，パーティクルと呼ばれる粒子の集団によって表現される．

パーティクルフィルタのアルゴリズムは下記の通りである．

- (1) 初期のパーティクル分布を生成する（事前情報がない場合は，パーティクルは一様に分布する）．
- (2) 下記のステップを繰り返し実行する．
 - (a) 状態遷移モデル（式 (1)）に基づいて，各パーティクルを遷移させる．
 - (b) 観測値 y から，観測モデル（式 (2)）に基づいて，各パーティクルの尤度 $p(x|y)$ を計算する．
 - (c) 尤度に比例する確率によって，次のステップに残すパーティクルを復元抽出する．

ここで，パーティクルフィルタを行うためには，パーティクルの状態遷移モデルと尤度計算のための観測モデルを適切に設計する必要がある．

3.2 状態遷移モデル

移動体の位置の状態遷移は，文献⁷⁾ の一般的なパーティクルフィルタに倣って，下式で表わされるランダムウォークであると想定する．

$$x(t) = x(t-1) + \eta(t) \quad (3)$$

ここで $\eta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2)$ ， σ_η^2 はランダムウォークの移動量の大きさを表すパラメータである．本研究では， $\sigma_\eta^2 = 1.0$ と設定した．

3.3 観測モデル

パーティクルフィルタを効果的に働かせるためには，状態ベクトル x_t に対する観測ベクトル y_t の発生する条件付き確率，すなわち，状態ベクトル x_t の尤度関数 $L(x_t, y_t) = p(y_t, x_t)$ を適切に設計する必要がある．ここで，ZigBee エンドデバイスの測位を考えた時には，状態ベクトル x_t は ZigBee エンドデバイス位置にあたり，観測ベクトル y_t は各 ZigBee ルータの観測した RSSI の値の組にあたる．つまり，ZigBee エンドデバイスが位置 x_t にいるという条件で，RSSI の組 y_t が得られる確率分布が現実に即した形で表現できればよい．

この問題に対し，位置と RSSI の関係を，ZigBee ルータ-ZigBee エンドデバイス間の距離に応じて RSSI が減衰する，という簡単なパラメトリック関数によって近似することが考

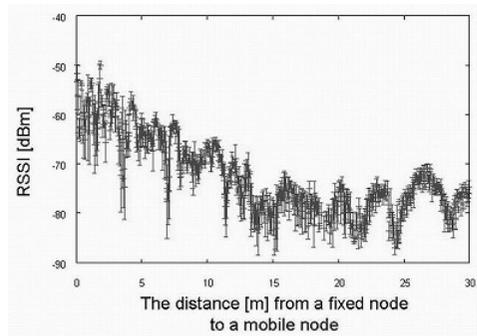


図 4 The relationship between the RSSI and the direct distance, observed in a laboratory hallway

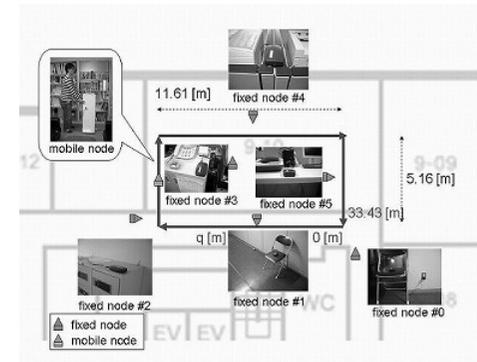


図 5 The laboratory floor

えられる．しかしながら，こうした試みはマルチパスによる RSSI の環境依存性によってうまくいかないことが知られている．

ここで，Fig. 4 は，実環境における RSSI の距離特性を表わしたものである．ZigBee ルータ-ZigBee エンドデバイス間の距離に応じて，RSSI が減衰する傾向が見られるものの，4m, 7m 各地点での急激な減衰など，強い環境依存性があることがわかる．したがって，こうした環境依存の傾向を，事前観測に基づいて表現する，尤度関数の設計法が必要となる．

本研究では，尤度関数を下記のように設計する．まず，RSSI の距離特性の平均値を \bar{y} を，区分的に直線を用いて近似する．さらに，この平均値に対して，分散 σ_e^2 の正規ノイズを加える．つまり，尤度関数 $L(x_t, y_t)$ は次式で定義される．

$$L(x_t, y_t) = \prod_i \mathcal{N}\left(y_t^{(i)} | \bar{y}^{(i)}, \sigma_e^2\right) \quad (4)$$

正規分布の分散 σ_e^2 は，計測データより 16.0 とした．

4. 実験

ここでは，前述の仕組みを用いて，実屋内環境を生活する実験者に対し測位実験を行い，測位システム実現に向けた課題について検討したい．

まず，測位利用のための観測モデルに対する事前計測を行った．次に実験者がその環境の決められた各地点を移動した際の RSSI データをテストデータとして用意する．そのテストデータに対し，パーティクルフィルタによる測位実験を行う．RSSI の事前計測を実験 1 とし，テストデータに対する測位実験を実験 2 と呼ぶことにする．

4.1 実験環境

実験は，北海道大学情報科学研究科棟（以下，情報棟）の 9 階フロアの廊下・部屋において行った (Fig. 5)．廊下の壁はコンクリート材，天井は石膏ボードで構成されており，壁には凹凸があり，吹き抜けの構造も含まれる．研究室の部屋では，パーティションなどの什器が多数配置されており，マルチパスの電波環境が非一様な屋内環境である．この環境は，本実験のために特別に用意した環境ではなく，日常的に現れる環境である．

また，当階には複数の研究室があり，それぞれの研究室には無線 LAN などの電波を利用する機器が設置されている．ZigBee の電波は無線 LAN と同じ 2.4GHz 帯を用いるため，それらの影響を受けることになる．

また，人の往来による遮蔽の影響を最小限にするため，計測実験は夜間に行い，人がいないことを確認して行った．

4.2 実験 1：計測機材

移動ノードは Fig. 8 に示す移動機材に載せて移動させることにする．人が端末を持つ高さを想定して，移動ノードの高さを 1.0 [m] に固定する．移動機材の台座部分の材質としては，電波の影響を考慮してポリスチレンのものを用いた．

また移動ノードには，一定間隔で RSSI の計測を要求するパケットを送信するプログラムを実装した．送信強度は ETRX2USB 標準の 0 [dBm] に固定している．ノードの物理的な性質によって，送信強度は 0 [dBm] から揺らぐことが考えられるが，本実験では無視することにする．マルチキャスト間隔としては，安全に送信できる送信間隔として 0.1 [sec] を



図 6 The laboratory floor (1)



図 7 The laboratory floor (2)

設定した。

位置に対する RSSI の計測を行うためには、プログラム上の計測時刻と、移動機材の位置との同期をとる必要がある。このとき、移動機材を等速で移動させ、時刻と位置を変換することが考えられる。移動機材を直線的に等速近くで移動させるためにレールを設置し、実験 1 においては牽引車により移動させた (Fig. 8)。計測時刻から変換した計測位置と実際の計測位置のずれを補正するために、移動機材の下にスイッチを取り付けた (Fig. 9)。移動機材がレール上のポイントを通る際に、スイッチが押され、計測 PC に通過時刻を



図 8 end device (for pre-observation)

記録する仕組みとした。これにより、ポイント通過時のみ位置と計測時刻の同期を取ることができる。ポイントとポイントの間に関しては、移動機材は等速で移動していると仮定し、変換処理を行うことで実際の計測位置とする。

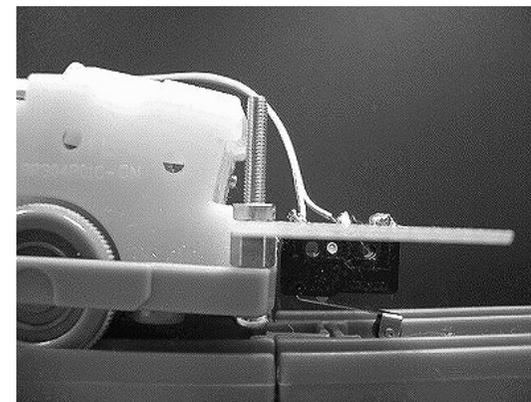


図 9 rail switch

ルータノードは、Fig.5 の 6 か所に固定した。

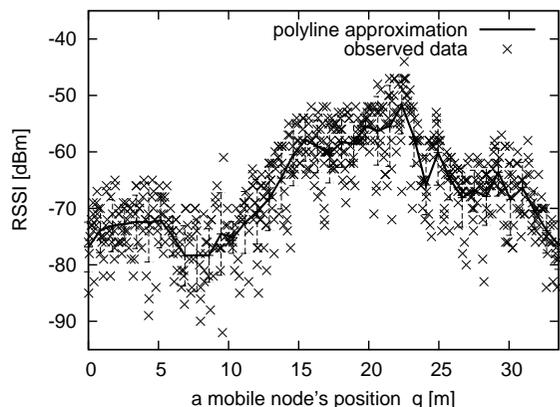


図 10 A RSSI data to a mobile node's transmission position, observed by fixed node 4

4.3 実験 1 : 計測結果

Fig. 10 は, ZigBee ルータノード 4 によって計測された RSSI を ZigBee エンドデバイスの送信位置に対してプロットしたものである. 図を見てわかるように, おおよそルータノードの直下に RSSI 値の極大があり, そこから離れるにつれて, 減衰していることがわかる. しかしながら, その減衰は単調ではなく, とろとろ落ち込んでいる部分が見受けられる. この部分は環境の影響が現れている部分であり, 単純な近似曲線では表現が困難な部分であるといえる.

4.4 実験 2 : 計測条件

次に, 計測によって得られた観測モデルを用いてパーティクルフィルタの測位計算を行う. 測位のための, テストデータは実験者が実験環境の部屋の中を, ZigBee エンドデバイスを持って下記のように移動して取得した.

(1) 初期位置は, 部屋右下付近の机上 (Fig. 11 地点 (i)). (2) 開始から 10 分経過後, 部屋の左下ソファ付近 (Fig. 11 地点 (ii)) へ移動. (3) 開始から 2 時間経過後, 廊下に出て 5 分程度トイレ内 (Fig. 11 地点 (iii)) へ移動. (4) その後 Fig. 11 地点 (iii) に戻り, すぐに初期位置の Fig. 11 地点 (i) に戻る. 3 時間経過後に終了.

テストデータのうち, ZigBee ルータ 4 の計測によって得られた RSSI は Fig. 13 の通り. 移動経路と併せて考えると, Fig. 11 地点 (ii) は, ZigBee ルータ 4 の直下に近いため, 比較的 RSSI の値は高くなるはずであるが, Fig. 13 を見てみると, 実際 0.3 時間, 1.0 時

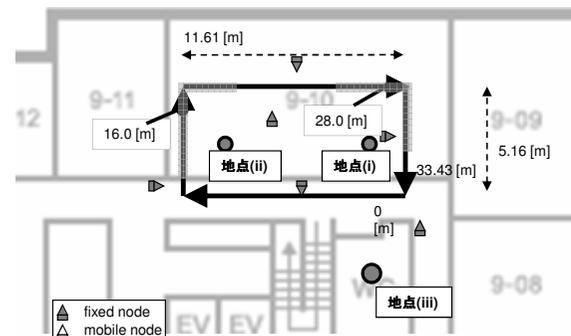


図 11 mobile sensor position



図 12 end device (for Test data)

間経過後周辺では, -58 [dBm] 程度と他のデータに比べ値が高くなっていることがわかる. 0.5 時間, 1.4 時間経過時は, Fig. 11 地点 (ii) にいるにも関わらず, 観測値が落ち込み大きく揺れているが, これは実験者が端末を手で持っていたために, 実験者自身が電波の障害となって影響を与えたためであると考えられる. この部分に関する影響は, 測位結果と併せて考えたい. また, 2.0 時間経過後から 2.1 時間経過までは, -90 [dBm] 以下と極端に値が落ち込んでいるが, これは Fig. 11 地点 (iii) に入ったため, ZigBee ルータからの通信がド

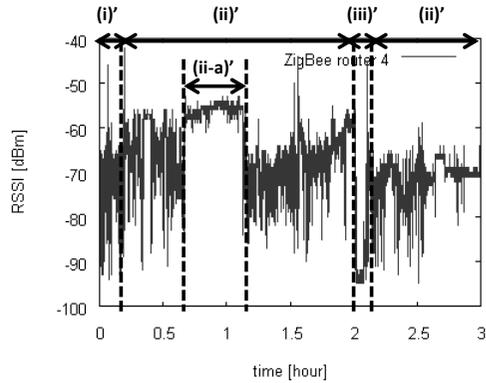


図 13 test data: RSSI data observed by fixed node 4

表 1 parameter set for experiment

name of parameters	value
number of particles	1000
positioning interval	0.1 [sec]
resampling interval	1.0 [sec]
σ_η	1.0
time length of test data	3 [hour]
number of partitions for polyline approx.	38
partition length for polyline approx.	0.86 meter

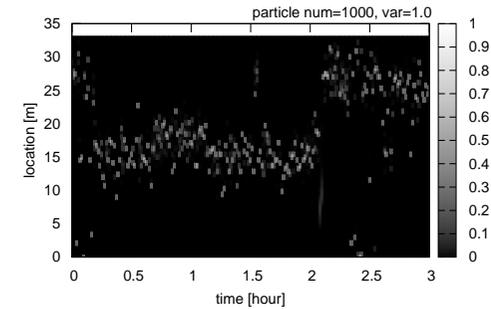


図 14 positioning results: number of particles=1000, variance of eq. (3) = 1.00

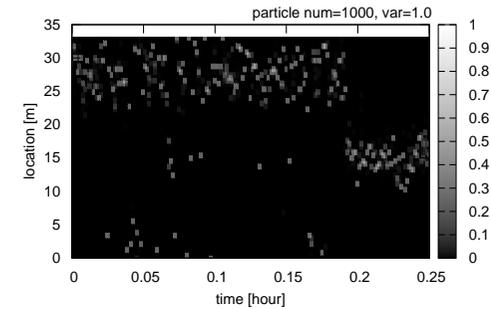


図 15 positioning results (around position(i))

アに遮断されたためであると考えられる。

これらのテストデータに対して、Table 1 のパラメータでパーティクルフィルタ実験を行った。

4.5 実験 2 : 測位結果

Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 に測位結果を示す。縦軸と濃度は、推定されたパーティクルの位置と分布を表わしている。

この結果をみると、(i)' 開始から 0.2 時間 (10 分) 経過後から 2 時間経過時までの間は、28m 付近に $\pm 4m$ 程度の範囲内に、(ii)' 開始から 0.2 時間 (10 分) 経過時までと 2.1 時間経過後から終了時まででは、16m 付近に $\pm 4m$ 程度の範囲内に、パーティクルの分布が推定されていることが分かる。しかしながら、特に (ii-a)' の区間においては、分布の中

心が 3m 程度、正方向にずれているように見てとれる。

また、(iii)' 2 時間経過後から 2.1 時間経過後までは、6m 付近に推定されているが、この部分に関しては、パーティクルの分布が比較的広がっていることがわかる。

5. 考 察

まず、区間 (ii)' に関してであるが、実験 1 では、人が持っていないとき (区間 (ii-a)') には RSSI の分布変動が小さく、人が持っているとき (区間 (ii-a)' 以外) は分布変動が比較

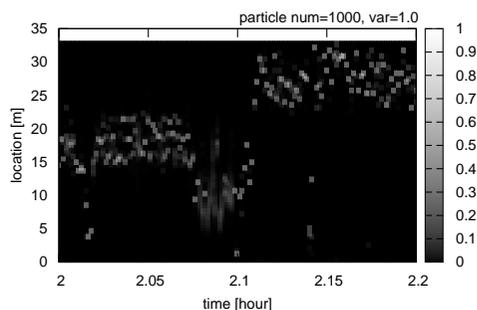


図 16 positioning results (around position(iii))

的が大きく、RSSI のレベルが下がる傾向が見られた。また、得られた観測データで測位すると、人が端末を持って測位した結果は、端末を持たないで測位した結果と比べて、座標の正方向に移動している傾向が見られた。したがってこの結果は、人が持つことによって、測位結果に変化が生じることを示唆する一例となっているといえる。

同じ位置にいるときに、状態によって測位結果が異なるということは、少なくともどちらかの状態では、測位結果に誤差が生じているはずである。実際のサービスに測位することを考えたときには、人が持っている、置いている、バッグに入れているなど、様態の変化に依らず正しい測位結果を与える方法の検討が必要となる。

区間 (iii)' においては、この地点は Fig. 11 地点 (iii) に対応するが、事前計測の範囲から外れている上、廊下からドアにより遮断され、ZigBee ルータが観測値を得られなかったために、推定の信頼性が落ちパーティクルがばらついたものと考えられる。したがって、扉やパーティションなどの遮蔽物は、測位精度に影響を与えるといえる。

6. おわりに

前述のサービスを適用する実環境における測位システム構築に対する課題を明らかにすることを目的として、研究室における端末測位環境を構築し、環境を生活する人の測位実験を行った。

実験結果より、実環境においては、人やパーティションなどの遮蔽物が、RSSI 変動に影響を与え、測位結果に影響を与える可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Rabaey, J. M., Ammer, M. J., da Silva, J. L., Patel, D. and Roundy, S., Pico-Radio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *Computer*, Vol.33, No.7, pp.42-48 (2000).
- 2) Patwari, N., Ash, J. N., Kyperountas, S., Hero, A.O., Moses, R.L. and Correal, N.S., Locating the nodes, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.22, No.4, pp.54-69 (2005).
- 3) Sheng, X. and Hu, Y.H., Maximum Likelihood Multiple-Source Localization Using Acoustic Energy Measurements with Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.53, No.1, pp.44-54 (2005).
- 4) Seshadri, V., Zaruba, G.V. and Huber, M., A Bayesian Sampling Approach to Indoor Localization of Wireless Devices Using Received Signal Strength Indication, *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, Vol.2005, pp.75-84 (2005).
- 5) Evennou, F. and Marx, F., Advanced integration of WIFI and inertial navigation systems for indoor mobile positioning, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol.2006, pp.164-174 (2006).
- 6) Zaruba, G.V., Huber M., Kamangar F.A. and Chlamtac, I., Indoor location tracking using RSSI readings from a single Wi-Fi access point, *Wireless Networks*, Vol.13, No.2, pp.221-235 (2007).
- 7) Doucet, A., Freitas, N.D. and Gordon, N., *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, Springer (2001).