

無線 LAN AP を用いたセンサノードの測位に向けた 電波減衰モデル構築実験

富重 晃季[†] 石田 繁巳[†] 田頭 茂明^{††} 福田 晃[†]

† 九州大学大学院システム情報科学府・研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地

†† 関西大学総合情報学部 〒569-1095 大阪府高槻市靈仙寺町 2-1-1

あらまし 筆者らは、屋内において大規模センサネットワークを構築する際に課題となるセンサノード設置時のノードの測位に対して、無線 LAN アクセスポイント (AP) を測位基準ノードとして利用する測位システムの構築を目指している。無線 LAN は広く普及しており、屋内には多くの無線 LAN AP が設置されその設置場所が管理されているため、これらを測位基準ノードとしてセンサノードを測位することで新たに測位基準ノードを設置することなくセンサネットワークの構築が可能となる。これに向け本稿では、通信方式の違うセンサノードで無線 LAN アクセスポイントの RSSI をリアルタイムに観測するシステムを示す。また、センサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出するモデルの構築に向けて、距離に応じた電波減衰モデルの確認を行った実験について報告する。

キーワード センサネットワーク、測位システム、電波減衰モデル。

Experiment for Construction of Radio Attenuation Model aiming at Localization of Sensor Node using WLAN AP

Koki Tomishige[†], Shigemi Ishida[†], Shigeaki Tagashira^{††}, and Akira Fukuda[†]

† Graduate School/Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

†† Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract We are aiming to build a localization system using wireless LAN (WLAN) access points (APs) as anchors for large scale sensor networks. WLAN is widely used today and many WLAN APs are installed in indoor environment. By using these APs, we can easily construct sensor networks without newly deployed anchors. In this paper, we present a realtime AP-RSSI monitoring system using sensor nodes. We also conduct experiments to construct a radio attenuation model for sensor localization.

Key words sensor network, localization system, radio attenuation model.

1. はじめに

近年、農業・漁業・林業などの第一次産業分野での高密度センシング・知的モニタリングや、建設・交通・環境・健康分野での構造物モニタリング・交通支援・エネルギー削減支援・人々の健康支援など、幅広い分野においてセンサネットワークの実用化が進められている [1]。このようなセンサネットワークにおいて、センサノードがどこに設置されているかという情報は、ネットワークの構築やルーティング、対象エリアの把握、位置情報サービスの提供、対象物の追跡に有益である [2]。例えば、室温の温度管理や建物への不正侵入検知などでは、どこの温度を制御するのか、どこに侵入者がいるのかを検知することが求められる。

一般に、センサノードの位置は手動による測定や GPS によって取得される。このため、GPS を用いることのできない屋内に

おいて、数百から数千台のセンサノードを設置する大規模センサネットワークを構築する際にはセンサノード設置時のノードの測位が大きな課題となる。大規模な屋内センサネットワークの代表例として、ビルの危機や設備等の運転管理によってエネルギー消費量の削減を図るシステム BEMS (Building Energy Management System) や防犯システム、入退室管理などが挙げられる。これらの大規模センサネットワーク構築におけるセンサノード設置時のノードの測位がセンサネットワークの導入を妨げる一因となっている。

このような問題に対して、センサノードの測位技術を用いればセンサノードの位置設定を自動化できる [3] ことから、これまでにも多くの屋内測位技術の研究が行われてきた [2], [4], [5]。大規模センサネットワークの場合には、測位に必要となる測位基準ノードの設置が難点であるため、いかに少ない測位基準ノードで必要な測位精度を実現するかが重要となる。測位基準

ノード数の削減に向けて、測位したセンサノードを新たな測位基準ノードとする *Iterative Multi-lateration* という手法 [6] や測位基準ノード配置の最適化 [7] が報告されているが、これらは測位誤差が蓄積するため、大規模センサネットワークでは精度が大きく低下する。実際、長さ 43 m の廊下で 9 台のノードの測位を行った場合に最大で 7 m 程度の誤差が生じたことが報告されている [3]。

筆者らは、測位基準ノードを新たに設置することなく、センサノードを測位する手法の確立を目指している。これに向け、本研究では無線 LAN AP を測位基準ノードとして利用するセンサノード測位システムを提案する。無線 LAN は広く普及しており、ビルなどの屋内にはすでに多くの無線 LAN AP が設置され、設置場所や使用チャネルが管理されている。そこで、センサノードが検出可能な信号を無線 LAN AP に送信させ、センサノードでその信号の RSSI (受信信号強度) を測定する。この RSSI からセンサノードと無線 LAN AP の距離を算出し、多辺測量法によりセンサノードの位置を計算する。

このようなアイデアの実現に向けては 2 つの課題がある。1 つ目は、PC やスマートフォンなど多くの無線 LAN 端末が通信を行っている実環境の中で、ZigBee モジュールを搭載したセンサノードを用いて多数の無線 LAN 信号の中から無線 LAN AP のみの信号を検出し、RSSI を測定しなければならないことである。2 つ目は、センサノードの測位に向けて、測定した RSSI からセンサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出するための電波減衰モデルの構築が必要となることである。

これらの課題の解決に向け、本稿では通信方式の違いを超えてセンサノードで無線 LAN AP の信号を検知し、リアルタイムに RSSI を観測するシステムを示す。また、提案するシステムでセンサノードと無線 LAN AP の距離を算出するための電波減衰モデルの構築に向けて行った実験について報告する。

本稿の構成は以下の通りである。2. では既存のセンサノード測位技術について述べ、それぞれの課題について述べる。3. では筆者らが提案する無線 LAN AP を用いたセンサノード測位システムの概要を述べ、実現に向けた 2 つの課題を示す。そして、これらの課題に対する解決策を提案する。4. では実際にセンサノードを用いて無線 LAN AP の RSSI をリアルタイムに観測するシステムの実装を示す。5. ではセンサノードで無線 LAN AP の RSSI を取得する手法を評価するとともに、センサノード測位に向けた電波減衰モデルを構築するための実験について報告する。最後に 6. でまとめとする。

2. センサノード測位

センサネットワークは、センサ付きの無線通信端末 (センサノード) を相互に接続することによって各地点のセンシング情報を収集するネットワークである。収集した情報は温度管理や不正侵入検知システムなどに利用される。このようなセンサネットワークシステムにおいては対象エリアや対象物がどこにあるのかを検知しなければならないため、センサノードがどこに設置されているかという確かな情報が重要となる。

一般に、センサノードの設置位置は実地調査における手動での測定や、GPS を搭載した測位基準ノードと呼ばれるノードを基に決定されるため、実地調査にかかるコストや、GPS を用いることのできない屋内の測位が課題となる。

このような課題に対して、屋内位置測位における精度向上や、

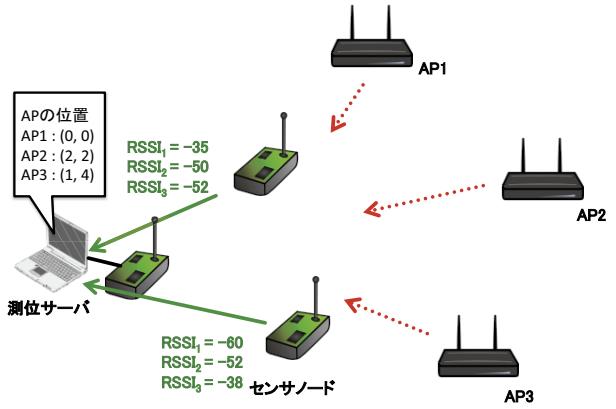


図 1 無線 LAN AP を用いたセンサノード測位システムの概要

環境構築が容易な測位技術に関する研究がこれまでにも多く行われてきた。測位精度の向上に関しては、ニューラルネットワークを用いてフィンガープリントアルゴリズムの学習を改善する手法 [8] や多辺測量における誤差を減らすために幾何学的特性を利用してノードの位置を推定する手法 [9] などが報告されている。これらの手法は本研究においても測位精度向上の観点から有用である。

容易な測位環境構築に向けては、測位したセンサノードを新たな測位基準ノードとする *Iterative Multi-lateration* [6] や、測位基準ノード配置の最適化により測位基準ノードの削減を図る研究 [7] などがこれまでに行われている。しかしながら、[6] では測位によって生じた誤差が蓄積してしまい、大規模センサネットワークには適していない。配置の最適化 [7] は理論的に測位基準ノードの数を減らすことが可能であるが、その配置で測位環境を構築するために新たな測位基準ノードの設置が必要となる。

また、ユーザの端末から得られた RSSI や加速度センサの情報を基に、ある地点での RSSI からフィンガープリントを作成して加速度センサからユーザの位置を推定し仮想の測位環境を構築する手法 [10] など、ユーザ協力型のフィンガープリント [11] が報告されている。しかしながら、センサノードの測位に向けて必要となるフィンガープリントを収集するためには、ユーザの位置を取得可能な特別なセンサノードをユーザに持ち運んでもらう必要があり、ユーザの協力を得るのが困難である。

3. 無線 LAN AP を用いたセンサノード測位システム

3.1 システム概要

図 1 に無線 LAN AP を用いたセンサノード測位システムの概要を示す。本システムは、センサノードと測位サーバ、無線 LAN AP によって構成される。無線 LAN AP は実環境中に設置されているものを使用する。まず、センサノードで AP の RSSI を取得する。センサノードは AP の RSSI を測位サーバに送信する。測位サーバは多辺測量法やフィンガープリントアルゴリズムによってセンサノードの位置を計算する。測位サーバは全ての AP の位置情報を保持する必要があるが、ネットワーク管理者によって AP が管理されていることが多いため、AP の位置情報は容易に取得できることを想定している。

このようなアイデアの実現に向けては、以下の 2 つの課題がある。

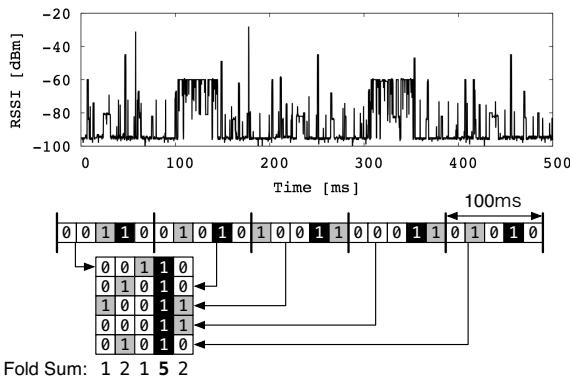


図 2 折り返し加算によるビーコン検出

(1) 無線 LAN AP の RSSI 測定

一般に、センサノードは IEEE 802.15.4 無線通信規格である ZigBee モジュールを搭載しており、IEEE 802.11 無線通信規格である無線 LAN の信号を受信することはできない。無線 LAN AP が設置されている環境では多数の無線 LAN 機器が通信を行っていることが想定されるため、ZigBee モジュールを使用して多数の無線 LAN 信号の中から無線 LAN AP の信号のみを検出し、その RSSI を測定する技術が必要となる。

(2) 電波減衰モデルの構築

課題 (1) の手法によって取得できるのは、無線 LAN AP の RSSI 値である。センサノードの測位に向けては、センサノードで取得した無線 LAN AP の RSSI 値からセンサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出する必要がある。このため、距離に応じた RSSI 値の電波減衰モデルの構築が必要となる。

以降では、これらの課題について検討する。

3.2 無線 LAN AP の信号検出

3.1 で述べたように、本システムで測位基準ノードとして利用する無線 LAN AP は IEEE 802.11 無線通信規格で通信を行うため、IEEE 802.15.4 無線通信規格で通信を行うセンサノード (ZigBee) とは直接通信を行うことができない。しかし、無線 LAN と ZigBee は同じ 2.4 GHz 帯を利用しておらず、チャネルによっては周波数帯が重なっているため、信号の有無を観測することは可能である。

センサノードで無線 LAN 信号を観測できるという点に着目し、無線 LAN AP ビーコンフレームの周期性を利用してセンサノードで無線 LAN AP を検出する ZiFi [12] が報告されている。本研究でもこの ZiFi を用いて無線 LAN AP を検出する。ZiFi によるビーコン検出の概要を図 2 に示し、以下で手順について説明する。

- (1) 無線 LAN AP のビーコン周期を設定する。ビーコン周期の設定に関して注意が必要である。これについては 3.3 で述べる。
- (2) センサノードを使用して特定のチャネルの RSSI をサンプリングする。
- (3) サンプリングしたデータに対し、ある閾値によって信号の有無を 1 (信号有り)、0 (信号無し) で置き換える。
- (4) (1) で設定したビーコン周期で折り返す。本論文では、これを折り返しと呼ぶ。
- (5) 折り返しによりできた行列を列ごとに加算する。

(6) 設定した周期で折り返すとビーコンの周期性により、ある列に信号が重なる。加算したリストの最大値の列を無線 LAN AP のビーコンフレームとして決定する。

3.3 ビーコン周期の設定

ビーコン周期の設定として、互いに倍数でないビーコン周期を選択する必要がある。これは、使用するビーコン周期が他のビーコン周期の倍数でなければ、ビーコン周期で信号を折り返すことによって他のビーコンと間違えることなく目的のビーコンを検出できるからである。以下でそれを証明する。

定理 1. t_A, t_B は正の整数であり、 t_A は t_B の倍数でないとする。周期 t_B のビーコンを含む信号を周期 t_A で折り返すとき、周期 t_B の信号が同じ列に現れるのはたかだか $\text{lcm}(t_A, t_B)/t_A$ 行に 1 回である。ここで $\text{lcm}(t_A, t_B)$ は t_A と t_B の最小公倍数である。

証明. 背理法によって証明する。長さ $\text{lcm}(t_A, t_B)$ の信号を周期 t_A で折り返す場合を考える (図 3)。長さ $\text{lcm}(t_A, t_B)$ の範囲で周期 t_B のビーコンが 2 回以上同じ列に現れることが仮定されるため、

$$m \cdot t_B = n \cdot t_A \quad (1)$$

$$m < \frac{\text{lcm}(t_A, t_B)}{t_B}, \quad n < \frac{\text{lcm}(t_A, t_B)}{t_A} \quad (2)$$

となる正の整数 m, n が存在する。これより、

$$t_A = \frac{m \cdot t_B}{n} \quad (3)$$

となる。

- (1) n が m の約数であるとき

m/n は正の整数であるから t_A が t_B の倍数でないことと矛盾する。

- (2) n が m の約数でないとき

t_A 及び t_B は正の整数であるから、 n は t_B の約数である。 $t_B/n = k$ とおくと k は t_A と t_B の公約数である。ここで、 t_A と t_B の最大公約数を $\text{gcd}(t_A, t_B)$ として $\text{lcm}(t_A, t_B) \cdot \text{gcd}(t_A, t_B) = t_A \cdot t_B$ であるから、

$$\frac{\text{lcm}(t_A, t_B)}{t_A} = \frac{t_B}{\text{gcd}(t_A, t_B)} \quad (4)$$

となる。 n, t_B は正の整数であるから、式 (2), (4) を用いれば

$$k = \frac{t_B}{n} > \text{gcd}(t_A, t_B) \quad (5)$$

となり、 $\text{gcd}(t_A, t_B)$ が最大の公約数であることと矛盾する。以上より定理が成り立つことが示された。□

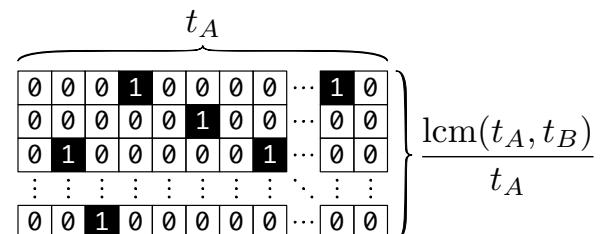


図 3 長さ $\text{lcm}(t_A, t_B)$ の信号の周期 t_A での折り返し

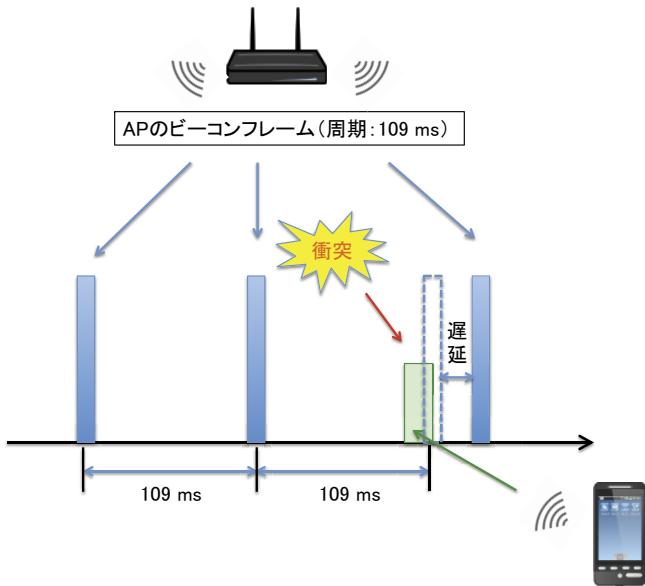


図 4 CSMA/CA の影響

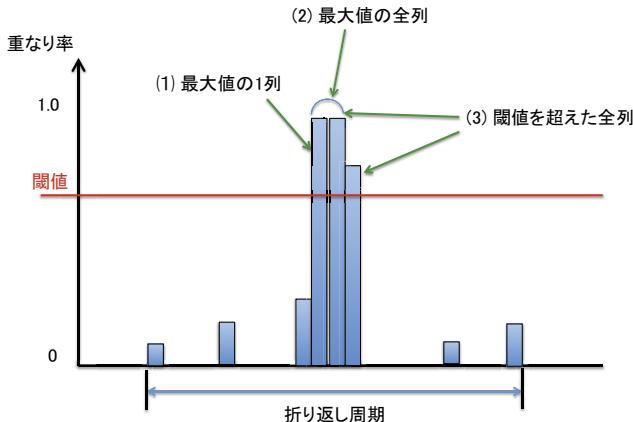


図 5 RSSI の決め方

上記より、互いに倍数でないビーコン周期を選択するが、設定値として倍数が 100 ms の倍数にならない値に設定する必要がある。これは、既製品の無線 LAN AP のビーコン周期の初期設定が 100 ms に設定されているからである。

3.4 無線 LAN AP の RSSI 取得

課題 (2) のモデル構築に向け、無線 LAN AP の RSSI を取得しなければならない。3.2 で述べた手法により AP の信号検出は可能であるが、図 4 に示すように、実際には無線 LAN の CSMA/CA 方式の影響によるビーコンの送信遅延やビーコンフレーム長の違いが影響し、他の信号を拾ってしまうことや、重なりのピークに幅を持つことがある。

これに対して図 5 のように、以下の 3 つのパターンで RSSI を取得し実験によって最適なパターンを決定する。折り返し回数に対する重なり回数を重なり率とする。

- (1) 重なり率が最大となる列のうち 1 列。
- (2) 重なり率が最大となる全ての列。
- (3) 重なり率が一定割合以上となる全ての列。

3.5 モデル構築

提案するシステムでセンサノードの測位を行うために、センサノードで取得した無線 LAN AP の RSSI 値から、センサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出するモデルを構築しなけれ

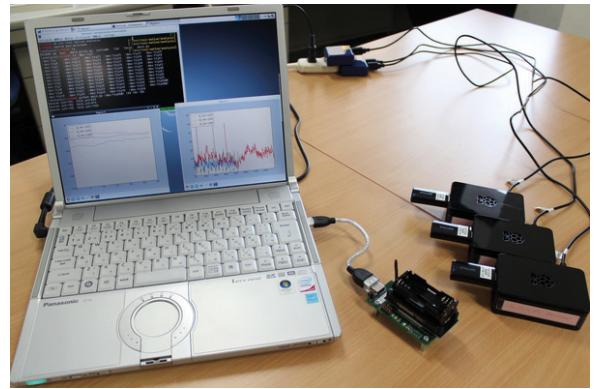


図 6 実装したシステム

ばならない。フリスの伝送公式より、送信アンテナの送信電力を P_t 、利得を G_t 、受信アンテナの利得を G_r 、波長を λ とすると、距離 d における受信電力値 (RSSI) は以下の式で表される。

$$\text{RSSI} = \left(\frac{\lambda}{4 \pi d} \right)^2 \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r \quad (6)$$

式 (6) の両辺の常用対数をとって係数をまとめると、以下の式が得られる。

$$\text{RSSI}_{[\text{dBm}]} = A + B \cdot \log_{10} d \quad (7)$$

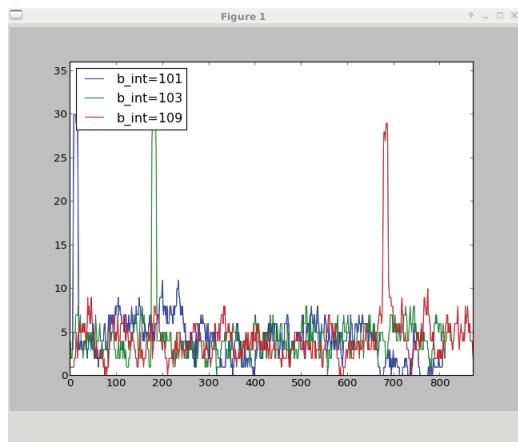
このモデルを想定し A, B のパラメータを決定すれば良い。しかし、送信機器と受信機器が帯域幅と中心周波数の違う ZigBee と無線 LAN であるため計算によって導出するのは困難である。本研究では実験によって取得した実測値を用いてパラメータ A, B を決定する。

4. 実 装

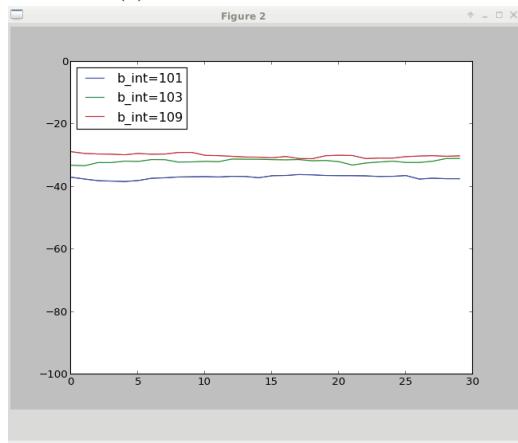
無線 LAN AP を用いたセンサノード測位システムの実現性を検証するために、センサノードによる無線 LAN AP の RSSI 観測システムを実装した。図 6 に実装したシステムを示す。アクセスポイント (AP) としては、シングルボードコンピュータの Raspberry Pi を使用した。Raspberry Pi には AP 用 OS である OpenWrt をインストールし、無線 LAN モジュールとして Buffalo 社製 WLI-UC-G301N を使用した。センサノードにはクロスボーラー株式会社の MICAz (MPR2600J) を使用した。MICAz は無線モジュールに IEEE 802.15.4 ZigBee 準拠の Texas Instruments 社製 CC2420 を搭載しており RSSI の取得が可能である。CPU は ATmega128L を搭載しておりクロック周波数 7.37 MHz で動作をする。MICAz には OS を入れることなく C 言語とアセンブリ言語で実装したプログラムを動作させることによって実行速度を上げた。

センサノードは PC とシリアル通信で接続されており、最大伝送速度 115,200 baud で通信ができる。センサノードは 128 μ 秒ごとに特定のチャネルの RSSI をサンプリングし、PC へ送信する。RSSI は 8 bit 符号付整数で表現され、シリアル通信では RSSI データを 1 つ分送るのに 10 bit 必要となるが、一度に送信できるのは ASCII 文字 (7 bit) 分であるため転送速度が不足する。CC2420 による RSSI オフセットはおよそ -45 dB であり、観測された RSSI 値から 45 を引くとおよそ 0 ~ -99 の値をとるためこれを 7 bit に圧縮して送信する。

PC 側の処理は python で実装し、センサノードからの RSSI



(a) 3つの無線 LAN AP の検出



(b) ビーコン RSSI の観測

図 7 無線 LAN AP の検出とビーコン RSSI の観測

データ受信と折り返し処理による AP RSSI の取得、AP RSSI のプロットを並列に動作させることで RSSI のリアルタイム観測を可能とした。

実際に実装したシステムを用い、異なるビーコン周期 (101 ms, 103 ms, 109 ms) を持つ 3 つの AP が同時に稼働している環境で RSSI を観測した様子を図 7 に示す。図 7 (a) より、3 つのそれぞれの周期で折り返しをすることで、3 つの AP を検出できていることが分かる。また、図 7 (b) より、無線 LAN AP のビーコンフレームの RSSI には揺らぎがあることが確認できる。このような状況において、3.4 で述べた手法により RSSI からセンサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出するため、観測した RSSI の代表値をどのように決定するか検討しなければならない。

5. 評 価

無線 LAN AP を測位基準ノードとしたセンサノード測位システムの実現に向けた電波減衰モデル構築実験を行った。

実験は他の無線 LAN 機器の影響や壁など建物の影響を避けるため、周囲に障害物のない大学内の広場にて行った。図 8 に示すように、1 つの無線 LAN AP (Raspberry Pi) に対して、50 cm~500 cm までの 50 cm 刻みと、600 cm~1500 cm までの 100 cm 刻みで直線上にセンサノードを 20 台並べ、RSSI を 128μ 秒間隔で 1 分間に渡って同時に測定した。なお、各センサノードは三脚を使用し地面から 40cm の高さに設置した。チャネルは固定とし、無線 LAN AP は 11 ch に、センサノード

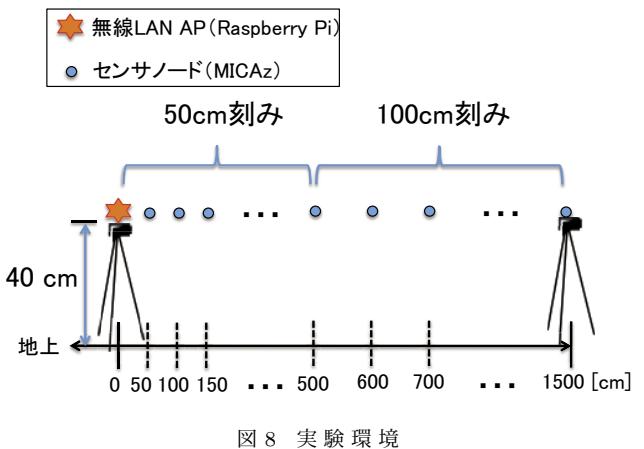


図 8 実験環境

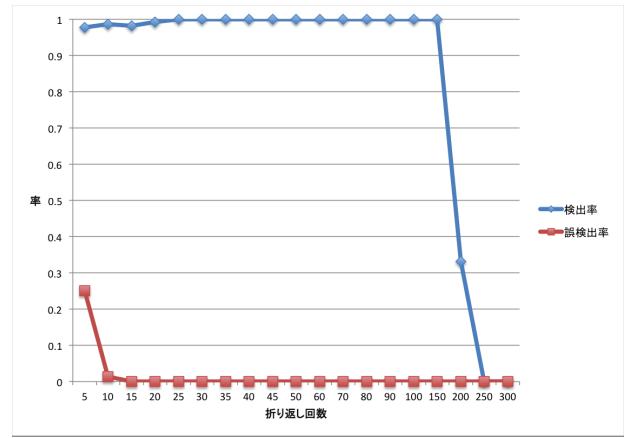


図 9 折り返し回数と検出率

(ZigBee) は 22 ch に設定した。無線 LAN AP の 11 ch は中心周波数 2.462 GHz、帯域幅 22 MHz、ZigBee の 22 ch は中心周波数 2.460 GHz、帯域幅 2 MHz であるから、ZigBee の 22 ch で無線 LAN の 11 ch の RSSI 信号を観測することができる。無線 LAN AP のビーコン周期は 109 ms に設定した。

5.1 折り返し回数と検出率

無線 LAN の CSMA/CA 方式の影響によるビーコンの送信遅延やビーコンフレーム長の違いが、3.2 の手法においてビーコンの検出率に影響を与えることが想定される。提案する手法で、無線 LAN AP のビーコンを検出するには何回の折り返しが必要となるか確認するために、折り返し回数と検出率を評価した。検出率とはサンプリングしたデータに対し 109 ms で折り返しをした時の重なり率が一定以上になる割合で、誤検出率とは 109 ms 以外の周期で折り返しをした時の重なり率が一定以上になる割合である。3.2 で示した通り、互いに倍数でないビーコン周期を設定した時に互いのビーコンが同じ列になる確率は最大でも 5 割であるため、重なり率が 7 割を超えたものを検出成功とした。

図 9 に折り返し回数と検出率を示す。図 9 より、折り返し回数を多くすると検出率が下がり、折り返し回数が少ないと誤検出率が高くなることがわかる。これは、折り返し回数が少ないと偶然観測された信号をビーコンフレームとして誤検出してしまうためと考えられる。また、折り返し回数が多いと CSMA / CA などの影響により安定したビーコンが得られず、検出率が下がるためと考えられる。検出率と誤検出率の結果から考えると、提案する手法では 30 回の折り返しを行うことで目的の

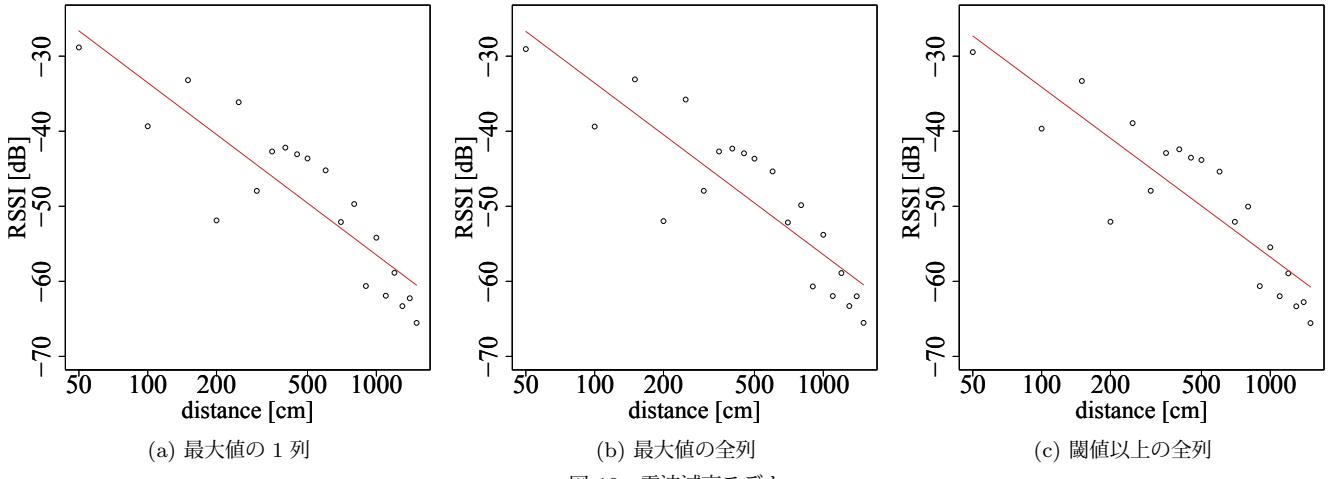


図 10 電波減衰モデル

表 1 パラメータと標準残差

	A	B	標準残差
(a) 最大値の1列	12.357	-22.946	5.308
(b) 最大値の全列	12.135	-22.859	5.347
(c) 閾値以上の全列	11.164	-22.643	5.107

AP を十分に検知可能であることが分かった。

5.2 電波減衰モデル

3.4 で述べたように、無線 LAN AP の RSSI をどのように決定するかで RSSI の値が変わりモデルに影響を与えることが予想される。より精度の良いモデルを構築するために、どの値を AP の RSSI の代表値として用いるのが最適なのかを評価するために、実験で取得した各地点での RSSI を 3.4 で示した 3 つのパターンで取得し電波減衰モデルを比較した。電波減衰モデルは 3.5 で示したモデル式を想定し、最小二乗法によりパラメータを導出した。

図 10 に各パターンでの最小二乗法で導出したモデルの結果を示す。また、表 1 に各パターンでのパラメータと自由度 18 での標準残差を示す。図 10 と表 1 より、どの RSSI を選択しても大差がないことが分かる。サンプル数が最も多くなるものが適切であると考えられる。

6. おわりに

本稿では、屋内において大規模センサネットワークを構築する際に課題となるセンサノード設置時のノードの測位に対して、無線 LAN AP を測位基準ノードとして利用する測位システムを示した。ZigBee モジュールを搭載するセンサノードで無線 LAN アクセスポイントの RSSI をリアルタイムに観測するシステムを実装し、無線 LAN AP の検出率を評価した。また、センサノードと無線 LAN AP 間の距離を算出するモデルの構築に向けて、距離に応じた電波減衰モデル構築に向けた実験を行った。今後の課題として、本稿で示した電波減衰モデルを基に実際の測位システムへ応用し、測位精度を検証する必要がある。また、無線 LAN AP の送信チャネルとセンサノードの受信チャネルが RSSI 値に与える影響を考慮した測位計算手法を検討する必要がある。

文 献

- [1] 大橋正良、大槻知明、"ユビキタスセンサネットワーク," 信学誌, vol.95, no.9, pp.772–778, Sept. 2012.

- [2] L. Cheng, C. Wu, Y. Zhang, H. Wu, M. Li, and C. Maple, "A survey of localization in wireless sensor network," Int. J. Distributed Sensor Networks, vol.2012, pp.1–12, Nov. 2012. Article ID 962523.
- [3] N. Wirström, P. Misra, and T. Voigt, "Spray: A multimodal localization system for stationary sensor network deployment," Proc. Annual Conf. Wireless On-demand Network Systems Services (WONS), pp.25–32, April 2014.
- [4] J. Wang, R.K. Ghosh, and S.K. Das, "A survey on sensor localization," J. Control Theory Applications, vol.8, no.1, pp.2–11, Feb. 2010.
- [5] A. Lédeczi and M. Maróti, "Wireless sensor node localization," Philosophical Trans. Royal Society A, vol.2012, no.370, pp.85–99, Jan. 2012.
- [6] M. Minami, Y. Fukuhara, K. Hirasawa, Y. Shigeaki, M. Mizumachi, H. Morikawa, and T. Aoyama, "DOLPHIN: A practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system," LNCS, vol.3205, pp.437–365, Sept. 2004. Proc. ACM Conf. Ubiquitous Computing (Ubicomp).
- [7] L. Huang, F. Wang, C. Ma, and W. Duan, "The analysis of anchor placement for self-localization algorithm in wireless sensor networks," Advances Wireless Sensor Networks, Communications in Computer and Info. Science, vol.334, pp.117–126, 2013.
- [8] A. Taok, N. Kandil, and S. Affes, "Neural networks for fingerprinting-based indoor localization using ultra-wideband," J. Communications, vol.4, no.4, pp.267–275, May 2009.
- [9] G.S. Kuruoglu, M. Erol, and S. Oktug, "Three dimensional localization in wireless sensor networks using the adapted multi-lateration technique considering range measurement errors," Proc. IEEE GLOBECOM Workshops, pp.1–5, Nov.–Dec. 2009.
- [10] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi, "WILL: Wireless indoor localization without site survey," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol.24, no.4, pp.839–848, April 2013.
- [11] P. Bolliger, "Redpin – adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration," Proc. ACM Int. Workshop Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT), pp.55–60, Sept. 2008.
- [12] R. Zhou, Y. Xiong, G. Xing, L. Sun, and J. Ma, "ZiFi: wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures," Proc. ACM MobiCom, pp.49–60, Sept. 2010.