

# 特別研究報告

題目

センサネットワークにおける受信信号強度を用いた  
位置測定システムの構築

指導教官

村田 正幸 教授

報告者

川添 朋律

平成 17 年 2 月 17 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

## センサネットワークにおける受信信号強度を用いた位置測定システムの構築

川添 朋律

### 内容梗概

センサネットワークではノード間のデータ通信に無線を利用するため、その受信信号強度 (RSSI) を利用することで、ノード間の距離を推定することが可能である。そのため、位置が既に分かっているセンサが複数存在すれば、ある発信源からの受信信号強度を用いて、発信源の位置推定を行なうことが可能となる。受信信号強度は、環境による影響のため変動が大きい。したがって、推定距離には多くの誤差が含まれるため、位置推定の精度を上げるには多くのセンサからのデータを取得する必要がある。しかし、ネットワークに対する負荷やセンサの消費電力を考えると、必要以上に多くのセンサからのデータ収集を行なうことは好ましくない。そこで、必要な精度を得るためのデータを、各ノードが自律分散的に判断し収集する方式が提案されており、シミュレーションによる性能評価が行なわれている。本報告では、この提案手法の実環境下における有効性を検証するため、沖電気工業株式会社の製品であるユビキタスデバイスを利用したセンサネットワークを構築し、実証実験を行った。実験の結果、センサノードがデータを送出するかどうかを定める受信信号強度の閾値を設定することにより、ターゲットに近いセンサからのデータのみを効率的に収集できることが示された。また、センサの配置密度を  $0.27$  個/ $m^2$  とした場合、位置推定誤差を  $1.5\text{--}2$  m 程度まで高められることが明らかとなった。

### 主な用語

センサネットワーク、位置推定、受信信号強度 (RSSI)、データ収集、最小二乗平均推定 (MMSE)

## 目次

1	はじめに	5
2	位置推定およびデータの収集方法	7
2.1	位置推定の方法	7
2.2	データ収集方法	9
3	位置推定システムの構築	11
3.1	ユビキタスデバイス	11
3.2	ZigBee	15
3.3	構築システムの概要	16
4	システムの実験と評価	19
4.1	受信信号強度と距離の関係の測定	19
4.2	位置推定システム	20
5	おわりに	27
	謝辞	28
	参考文献	29

## 目 次

1	位置推定システムの概要	7
2	ユビキタスデバイスの外観	12
3	ユビキタスデバイスの外観 (RS-232C ボードを追加したもの)	12
4	ユビキタスデバイス制御プログラムのフローチャート	15
5	パケットのフォーマット	18
6	受信信号強度と距離を測定するシステムの概要	19
7	廊下での測定	21
8	会議室での測定	21
9	廊下での測定結果	22
10	会議室での測定結果	22
11	会議室へのセンサの配置	23
12	会議室での位置推定実験	24
13	受信信号強度と収集個数の関係	25
14	受信信号強度と推定精度の関係	26

## 表 目 次

1	ユビキタスデバイスの主な仕様 . . . . .	13
2	ZigBee と Bluetooth の比較 . . . . .	16
3	パケットの先頭 1 バイトとメッセージの種類との対応 . . . . .	18
4	収集したいデータの個数と受信信号強度の閾値の関係 . . . . .	24
5	受信信号強度の閾値とデータの収集予定個数の関係 . . . . .	25

## 1 はじめに

センサネットワークとは、センサに処理部、通信部および電源を加えたセンサノードによって構成されるネットワークである。近年の技術開発によってノードの小型化が進むとともに ZigBee などのプロトコルの標準化が進んでおり、今後は幅広く利用されていくと考えられる。センサネットワークにおいて、それぞれのセンサノードは自律的に動作し、付随するセンサに応じて温度や湿度、光量などのセンシングを行う。センシングによって得られたデータは、無線通信によって、データ収集のために配置されているシンクノードへ送信される [1]。このようなセンサネットワークは、多数のセンサを配置することで大規模な情報収集が可能となり、大気や水質、気温などの環境のモニタリングなど様々な分野に適用できる。

センサネットワークから利用者が得られる情報は、センサによって取得されたデータであるが、これらの情報に加えて位置情報が必要となる。たとえば気温を収集するアプリケーションでは、どの場所の気温なのかが意味を持つため、センサの位置情報が必要である [2]。また、位置情報を収集することで、利用者の位置によってふさわしい情報を提供するようなコンテキストウェア・アプリケーションを構築することも可能となる。位置情報を収集するセンサネットワークの応用として、屋内で利用可能な位置測定システムがあげられる。屋内においてターゲットの位置情報を取得することができれば、ショッピングモールや展示会場などにおいて、客の移動の追跡や誘導を行うシステムが実現できる。このようなシステムにさらにセンサ情報を加えることで、夏場には建物内で冷房の効いている温度の低い場所への誘導を行うことや、火災発生時には高温となっている場所を避けて利用者を誘導することも可能となる。また、センサノードとシンクノード間の通信は他のセンサノードを中継するマルチホップ方式で行うことが多いため、センサノードの位置を用いることでより効率的なルーティングを行うことができる [3]。

位置情報を得るための仕組みとしては GPS [4] が知られているが、GPS は衛星からの電波を受信して位置測定を行うために、一般に屋内では使用することができない。一方で、室内で高い精度の位置測定を行なう方法として、超音波やレーザを利用する方法がある。例えば超音波センサを利用した ActiveBAT システムは、屋内での距離推定の誤差は 10 cm 程度であり、非常に精度の高い位置推定を行なうことができる [5]。しかしこれらの手法は、測定装置のコストや消費電力が高いため、多数のノードをバッテリーで動作させるセンサネットワークに利用することは適切ではない。これらに代わって、センサネットワークの無線通信そのものを利用することで、屋内での位置測定を行なうシステムが考えられている [6]。センサネットワークでは、ノード間のデータ通信に無線を利用するため、その受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を利用することで、ノード間の距離を推定することが可能である。そこで、位置推定の対象となるノードから、あらかじめ位置が判明している固

定設置された複数のノードへ電波を送信し、その際の受信信号強度を収集する。受信信号強度は誤差を含むため、3点以上のデータを収集し、最小二乗平均推定 (MMSE: Minimum Mean Square Estimate) を用いることで対象ノードの位置を推定できる [2]。この方法は既存のセンサノードをそのまま利用できるため、位置推定を安価に実現できる方法として注目されている [7]。

しかしながら、電波強度はフェージングやシャドウイングなど無線伝播路の影響によって値が大きく変動するため、推定距離の誤差は大きくなる。例えば超音波計測を用いて距離推定を行う Medusa が最大 2 cm の誤差であるのに対して、電波強度を用いる WINS では最大 4 m の誤差が生じてしまう [2]。このように電波強度を用いた距離測定は誤差が大きいため、精度の良い位置推定を行うためには多くのセンサからのデータに基づいて位置推定を行なうことが必要となる。しかしながら、多くのデータを収集することはトラフィック量が増加し、ノードの消費電力が増大してしまう。また、負荷の増大に伴って、データを収集するために必要な時間が増加するために、リアルタイムな位置推定も困難となる。

この問題を解決するために、[8] では、まず必要な精度を得るためのデータ数をシミュレーションによって導出した。さらに、その結果に基づいて、センサが不均一に配置されている場合でも、センサノードが自律分散的に判断することで、必要な精度を得るためにデータ収集を行なう方式を提案している。この方式により、不必要なデータ収集を抑制し、ネットワークに対する負荷や消費電力を抑えることができる。さらに、最小二乗平均推定を用いて位置推定を行うためのデータについては、ターゲットからの距離が近い一定数のセンサからの情報を用いて推定を行うことで良好な結果が得られ、距離が離れていて誤差の大きなデータを収集しても位置推定精度は向上しないことが示されている [8]。この方式と推定精度については、シミュレーションによる評価のみが行なわれており、実環境でのデータ収集まで含めた評価はされていない。

そこで本報告では、この方式が実際のセンサネットワークにおいて有効であるかどうかを確認するために、沖電気工業株式会社の製品であるユビキタスデバイスを利用したセンサネットワークを構築し、提案方式の実証実験を行った。まず、ユビキタスデバイスの通信特性を明らかにするため、実験によって距離と受信信号強度との関係を明らかにする。次に、センサネットワークから距離データの収集を行ない、最小二乗平均推定を用いてリアルタイムに位置推定を行うソフトウェアを開発し、提案手法に対する評価を行なう。

以降、2章では最小二乗平均推定を用いて位置推定を行う方法および [8] の提案手法について説明を行う。3章では提案手法の評価に用いたユビキタスデバイスと、このデバイスが利用する無線通信規格 ZigBee、および構築したシステムについての説明を行う。4章において、実験結果を示し、提案手法の有効性および実用性を評価する。最後に、5章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

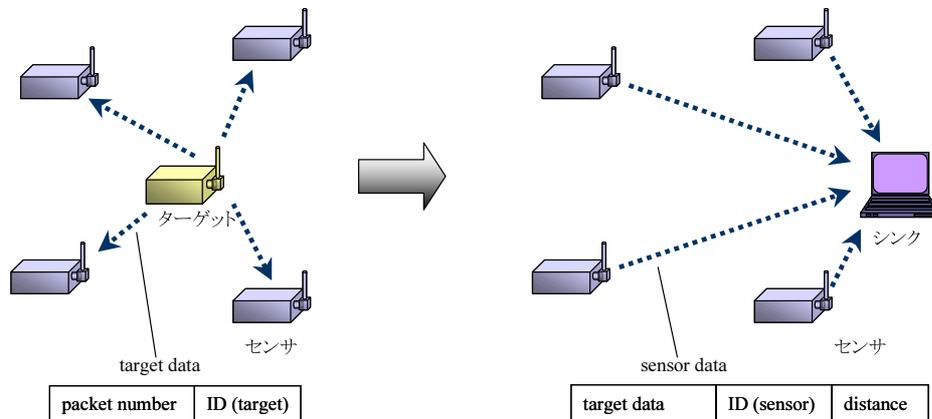


図 1: 位置推定システムの概要

## 2 位置推定およびデータの収集方法

本章では，センサネットワークにおける受信信号強度に基づいた位置推定の方法，および [8] で提案されているデータ収集方法についての説明を行う．

### 2.1 位置推定の方法

本報告で対象としているセンサネットワークにおける位置推定システムの構成を図 1 に示す．対象となるエリア内に，センサノードを固定して配置し，その位置はあらかじめわかっているものとする．位置推定の対象となるターゲットは移動が可能であり，一定間隔ごとに位置検出のためのパケットを送信する．複数のターゲットがエリア内に同時に存在する場合を考えて，ターゲットを区別するための ID をパケットに含めている．パケットを受信したセンサノードは，そのパケットの受信信号強度からターゲットとの距離を見積もり，結果をシンクノードへと送信する．シンクノードを経て，収集されたデータからターゲットの位置を推定することとする．以下に，位置推定を行う方法の詳細を説明する．

- センサの配置

すべてのセンサノードは固定的に配置され，配置後にも移動しないものとする．対象とするエリアの平面上に 2 次元の座標軸を設け，センサノードを設置する際には，その平面上の座標を各ノードに設定する．これらの座標データは，位置推定の計算を行なう際に必要となるため，計算を行なう箇所で保持する．あるいは，センサノードがデータとともに自分の座標を送ってくることで，位置推定の計算を行なうことができる．

- データの収集

各センサノードはターゲットからパケットを受信し、その受信信号強度を測定した後、受信信号強度と距離の関係から、センサとターゲット間の距離を推定する。受信信号強度と距離との関係は、あらかじめ減衰の影響を測定し、その結果から定式化することができる。ターゲットが送信するパケットには、ターゲットのID、パケットの送信時刻を区別するためにパケットの番号が含まれており、センサはパケットの受信後、ターゲットのIDと受信したパケットの番号、センサとターゲット間の距離を得る。それからセンサは、上記のデータに自センサIDを付加してシンクへと送る。

- 位置の計算

シンクノードでは、複数のセンサから集めたデータのうち、ターゲットIDが同じで、パケットの番号も同じであるデータを使用して、ターゲットの位置を計算する。本報告では、ターゲットの位置を計算するために最小二乗平均推定 (MMSE: Minimum Mean Square Estimate) を使用する [2]。以下では、2次元の場合の最小二乗平均推定による計算方法を紹介する。まず、 $i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) 番目のセンサが測定し推定した距離と、実際のターゲットの位置との差は式 (1) のようになる。

$$f_i(x_0, y_0) = d_i - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (1)$$

ここで、 $(x_0, y_0)$  はターゲットの位置、 $(x_i, y_i)$  はセンサの位置、 $d_i$  はセンサ  $i$  とターゲットとの測定した距離である。式 (1) で  $f_i = 0$  とし、式変形を行うと式 (2) が得られる。

$$-x_i^2 - y_i^2 + d_i^2 = (x_0^2 + y_0^2) + x_0(-2x_i) + y_0(-2y_i) \quad (2)$$

この方程式を解き  $(x_0, y_0)$  を求めるためには、3つ以上のセンサからデータを集める必要がある。解を得るために、 $k$  番目のセンサによる式を他のセンサによる式から引き、 $(x_0^2 + y_0^2)$  の項を消去する。

$$-x_i^2 - y_i^2 + d_i^2 - (-x_k^2 - y_k^2 + d_k^2) = 2x_0(x_k - x_i) + 2y_0(y_k - y_i) \quad (3)$$

式 (3) は、行列を用いることで式 (4) で表せる。最終的に解  $(x_0, y_0)$  は、式 (4) を変形した式 (5) を解くことで求めることができる。

$$y = Xb \quad (4)$$

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (5)$$

ここで,  $X, y, b$  は以下のように定義する.

$$X = \begin{bmatrix} 2(x_k - x_1) & 2(y_k - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_k - x_{k-1}) & 2(y_k - y_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y = \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 + d_1^2 - (-x_k^2 - y_k^2 + d_k^2) \\ \vdots \\ -x_{k-1}^2 - y_{k-1}^2 + d_{k-1}^2 - (-x_k^2 - y_k^2 + d_k^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.2 データ収集方法

次に, センサネットワークの各ノードが, 必要な精度を得るためのデータを自律分散的に判断し収集する方式について概要を説明する. この方式では, 各センサがデータを送るかどうかの判断は, 収集すべきデータ数, センサ周囲の密度とターゲットとの距離に依存し, ターゲットとの距離が計算結果よりも小さければ, シンクへとデータを送信する. センサの周囲の密度を測定するため, 各センサは一定期間ごとにパケットを送信することで, 自センサの存在を他のセンサに知らせる. また, 他のセンサからのパケットを受信し周囲のセンサ数を記録する. 周囲に存在するセンサ数から, センサの密度  $D$  は式 (9) によって求めることができる. ここで,  $R$  は各センサの通信範囲,  $M_i$  はセンサ  $i$  から  $R$  の範囲内にあるセンサ数である.

$$D = \frac{M_i}{\pi R^2} \quad (9)$$

システム全体として収集すべきデータ数を  $Z$  とすると、 $Z$  個のデータを収集するための距離を決定するには、 $Z$  個のセンサがターゲットからどれだけの範囲内にあるかを考えればよい。  $Z$  個のセンサがターゲットから距離  $D_i$  内にあるとすると、 $D_i$  は、密度と  $Z$  で式 (10) のように定義される。センサ  $i$  は測定した距離が  $D_i$  よりも短いときだけデータをシンクへ送信することで  $Z$  個のデータ収集が実現できる。

$$\frac{M_i}{\pi R^2} = \frac{Z}{\pi D_i^2} \quad (10)$$

式 (10) を変形することで、式 (11) が得られる。

$$D_i = R \sqrt{\frac{Z}{M_i}} \quad (11)$$

$D_i$  は  $M_i$  に依存して決定されるために、センサの少ない領域では  $D_i$  は大きい値となり、センサが多い領域では  $D_i$  は小さい値を取る。各センサが  $D_i$  に基づきデータの送信を判断するために、シンクでは不均一にセンサが配置されている場合でも、 $Z$  個のデータを収集することが期待できる。

### 3 位置推定システムの構築

実際の無線通信環境では、障害物や他の機器からの電波の影響などで、通信特性が変化するため、受信信号強度の変動も大きい。また、他のノードから送信されたパケットとの衝突も発生するため、理論通りにセンサノードからのデータ収集が行なえるとは限らない。前章で説明した位置推定のためのデータ収集方式は、パケットの衝突などを考慮しておらず、すべてのパケットがシンクで収集可能という仮定の下で、収集したデータ数と精度の関係を導出し、シミュレーションによる評価を行なっている。しかしながら、実際の動作環境における収集データ数と精度の関係は明らかではない。そこで、本報告では、実環境下における収集データ数と精度の関係を明らかにするために、沖電気工業株式会社の製品であるユビキタスデバイスを用いて、位置推定システムの構築を行った。本章ではまずユビキタスデバイスの概要について説明を行う。次に、ユビキタスデバイスが利用する通信規格である ZigBee について説明を行い、最後に構築したシステムについて述べる。

#### 3.1 ユビキタスデバイス

ユビキタスデバイスはセンサネットワークを構成するためのノードであり、ZigBee 仕様に基づいた通信を行うことができる。ZigBee の仕様については、次節にて説明を行う。このデバイスは入出力機能として、プッシュスイッチを 4 つ、LED を 6 つ、および汎用のアナログ入出力ポートを備えたボードを標準で装備している (図 2)。アナログ入出力ポートには温度センサなどのセンサを接続することができる。また、RS-232C ポートを備えたボードを装着することで、収集したデータを RS-232C ポート経由で PC に接続して送信することも可能になる (図 3)。

ユビキタスデバイスは単四電池 3 本、または AC アダプタで駆動できる。CPU としては ARM7 互換の ML67Q4003 を搭載しており、32KB の RAM および 512KB のプログラマブルな Flash メモリを搭載している。ユビキタスデバイスのプログラミングを行うために、UNIX の共通規格である POSIX に似た API が用意されており、この API を C 言語から利用して、自由にアプリケーションを作成可能である。無線コントローラとしては Chipcon 社の CC2420 [9] を搭載しており、このチップを利用して ZigBee 仕様に基づいた通信を行う。その他、送信出力の変更、受信信号強度の取得、スリープ制御などが可能である。

以下では、ユビキタスデバイスのプログラミング方法の概要について説明する。デバイスを操作するために、以下の 8 つの関数が用意されている。デバイスの操作はこれらの関数を通じて行うようになっている。

- open()



図 2: ユビキタスデバイスの外観



図 3: ユビキタスデバイスの外観 (RS-232C ボードを追加したもの)

表 1: ユビキタスデバイスの主な仕様

通信方式	ZigBee , PHY/MAC 層は IEEE802.15.4
無線コントローラ	CC2420
アンテナ	1/4 波長モノポールアンテナ
最大送信出力	1mW
CPU	ML67Q4003 (ARM7 互換)
RAM 領域	32KB
ROM 領域	512KB
電源	単四電池 3 本 , AC アダプタ
インタフェース	プッシュスイッチ 4 つ , LED 6 つ RS-232C 汎用アナログ入出力

入出力デバイスを利用可能にし、ファイルディスクリプタを得る

- close()  
入出力デバイスの終了処理を行う
- read()  
入力デバイスからの入力読み取りを行う
- write()  
出力デバイスへの書き込みを行う
- select()  
入出力の多重化を行う
- ioctl()  
入出力デバイスへの設定および設定取得を行う
- sysctl()  
システムへの設定および設定取得を行う
- time() / time\_set()  
時刻の設定および取得を行う

入出力デバイスとしては、以下のものが存在している。それぞれのデバイスはデバイスファイル名を持ち、そのデバイスファイル名を open() 関数に渡すことでデバイスの初期化およびファイルディスクリプタ (整数値) を得ることができる。

- /dev/rs0, /dev/rs1  
シリアルポート
- /dev/rf\_mac0  
RF 通信デバイス (MAC 層)
- /dev/sw0 – /dev/sw4  
プッシュスイッチ
- /dev/led0  
LED
- /dev/ad0 – /dev/ad3  
アナログ入力ポート
- /dev/pwm0 – /dev/pwm1  
アナログ出力ポート
- /dev/din0  
デジタル入力ポート
- /dev/dout0  
デジタル出力ポート

入出力を多重化するために、`select()` 関数が用意されている。この関数は引数として、読み取りを行いたいファイルディスクリプタの集合 (`readfds`)、書き込みを行いたいファイルディスクリプタの集合 (`writefds`)、および待ち時間を指定するようになっている。`select()` は呼び出された後、以下のいずれかの場合に制御を戻すようになっている。

- `readfds` の中で、読み取り可能なディスクリプタが生じたとき
- `writefds` の中で、書き込み可能なディスクリプタが生じたとき
- 指定された待ち時間が経過したとき

`select()` から制御が戻った後、読み出し、書き込み可能なファイルディスクリプタがあるかどうかのチェックを行い、あれば入力を読み出す、出力を書き込むなどの処理を行うようにする。これらの操作を行うために、ライブラリ中に専用のマクロが用意されている。

これらの機能を組み合わせたプログラムの例として、パケットの到着などのイベントを待ち、イベントの発生時に何らかの動作を行うプログラムのフローチャートを図 4 に示す。プ

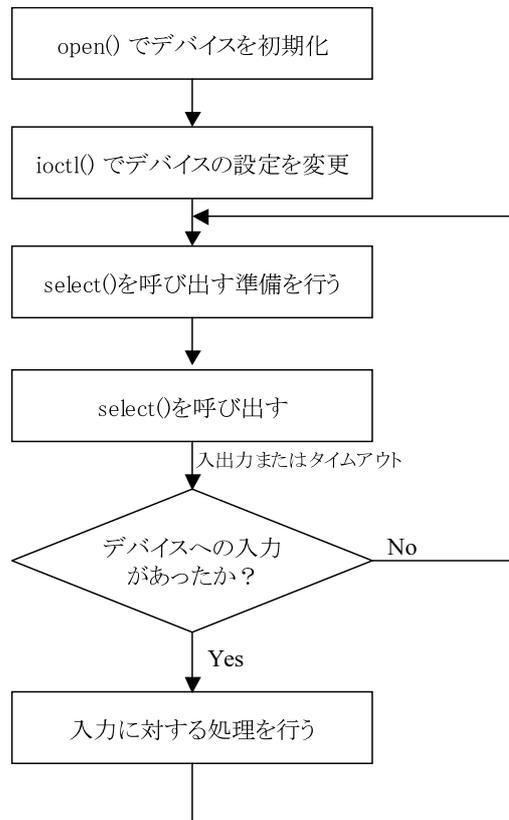


図 4: ユビキタスデバイス制御プログラムのフローチャート

プログラムは、まず入出力デバイスの初期化および設定を行う。その後 `select()` を呼び出す準備を行い、`select()` を呼び出す。パケットの到着やシリアルポートへの入力などのイベントがあった場合には `select()` から制御が戻る。また `select()` の呼び出し時に設定した一定時間が経過した後 (タイムアウト) にも制御が戻る。`select()` から制御が戻った後、入力があったかどうかを調べ、あればそれらに対する処理を行う。その後、再び `select()` を呼び出す準備を行い、これらの動作を繰り返すようにする。

### 3.2 ZigBee

ZigBee とは、ZigBee Alliance[10] が仕様の策定を進めている無線通信規格であり、PHY 層、MAC 層として IEEE802.15.4 で規定された無線通信方式を用い、その上位のネットワーク層、アプリケーション層を規格化したものである [11]。

ZigBee の特徴として、まず低消費電力であることがあげられる。また小型化、低コスト

表 2: ZigBee と Bluetooth の比較

	ZigBee	Bluetooth
無線仕様	直接拡散, O-QPSK 変調	周波数ホッピング拡散, FSK 変調
転送速度	最大 250kbit/s	最大 720kbit/s
伝達範囲	10-50m	10m
電源	乾電池を想定	充電機での仕様を想定
起動時間	電源投入から 30ms スリープから 15ms	電源投入から 3sec 以上 スリープから 3sec
プロトコルスタック	単純	複雑
ホストコントローラ	4/8 ビットマイコン	32 ビットマイコン

化にも特化している。ZigBee の特徴を、同じく低消費電力無線規格である Bluetooth と比較したものを、表 3.2 に示す。

ZigBee は電源投入やスリープモードからの復帰が高速であるという特徴も持っている。電源投入時には、ZigBee はおよそ 30ms で初期化が完了するのに対して、Bluetooth は数秒を要する。スリープモードからの復帰も同様に速度に大きな差がある。Bluetooth は主にネットワーク機器間でのデータ転送を想定している。つまり、以前はケーブルで接続されていた、電話機やコンピュータなどのデバイスなどで、機器同士の接続やファイルの転送などを行う際に利用されている。これらの用途では、初期化動作に少々時間がかかっても問題は無い。これに対して ZigBee は現在のリモコンなどに代表される、無線コントローラでの利用を想定している。これらリモコンなどのコントローラでは、ボタンを押してから反応するまでの時間が数 100ms 程度であることが求められる。これらの用途で数秒程度の時間がかかることは受け入れられない。このような場合に Bluetooth を用いると、常にスリープモードに入ることができないことを意味し、低消費電力が不可能となる。このように ZigBee と Bluetooth では得意とする分野が異なっており、棲み分けがなされている [12]。

また、プロトコルスタックは Bluetooth よりも ZigBee の方が単純である。ZigBee では 4 ビットや 8 ビットのマイコンをホストコントローラとして制御可能であるため、やり取りするデータ量の少ないセンサネットワークにおいては、ZigBee を用いる方が有利である。

### 3.3 構築システムの概要

本節では、実験のために構築したシステムについて説明を行う。構築したシステムはターゲット、センサ、シンクの 3 種類のノードから構成されている。これらノードはすべてユビキタスデバイスを利用しており、IEEE802.15.4 に準拠した通信を行っている。

ユビキタスデバイスの制限により、マルチホップでの通信は利用できないため、通信はすべてシングルホップで行っている。また、デバイスの仕様上、あるノードから他のノードへパケットを送信すると、送信元や受信先以外のノードでもそのパケットを受信することになる。したがって、ノードを指定して通信を行いたい場合には、各ノードにて受信したパケットの送信先 MAC アドレスと自ノードの MAC アドレスを比較し、一致している場合には自ノード宛のパケットであると判断する必要がある。また、ユビキタスデバイスでは、最大 127 バイトの可変長のデータを 1 つのパケットとして送信することが可能である。本実験では位置推定を行うことを目的としているため、センサにおけるターゲットからの受信信号強度以外のセンサ情報の収集は行っていない。

構築するシステムでは、ターゲットからの距離が近い一定数のセンサからの情報を用いて位置推定を行うことで良好な結果が得られることを示したい。そこで、あらかじめセンサにおいて、受信信号強度の閾値を設定しておき、ターゲットからの受信信号強度が閾値を上回った時にのみシンクへとデータを収集するようにした。この閾値を変化させることで、データを収集する個数を変化させることができるようになる。

本システムでは、以下の 2 種類のメッセージを定義している。

- 測定要求メッセージ

ターゲットからセンサへ、受信信号を測定するように要求するメッセージであり、特定のセンサへの送信ではないため、ブロードキャストにて送信を行う。なお、連続するリクエストを区別するため、メッセージにはシーケンス値を含んでいる。この値はメッセージを送信する度に変化させることとする。

- 受信信号強度報告メッセージ

センサからシンクへ、受信信号強度を報告するためのメッセージであり、ターゲットから受信したシーケンス値、およびターゲットの ID をシンクへと送信する。

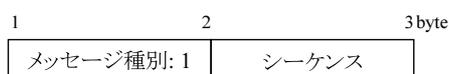
本システムでは、パケットの先頭 1 バイトでメッセージを区別できるようになっている。先頭 1 バイトとメッセージの対応は、表 3 の通りである。また、ターゲットからセンサへと送信するパケットのフォーマット、センサからシンクへと送信するパケットのフォーマットを図 5 に示す。

シンクには RS-232C 経由でパソコンを接続し、距離の推定、最小二乗平均推定を用いての位置の推定はすべてパソコン上で行った。パソコン上では Windows XP が稼動しており、距離の推定および位置の推定を行うプログラムは Visual C# .NET を利用して作成した。このプログラムにはあらかじめセンサノードの座標が入力しており、ターゲットとセンサノードとの間の距離を、収集した受信信号強度から推定する。受信信号強度から距離を推定する式については、後述する式 (13) を利用する。

表 3: パケットの先頭 1 バイトとメッセージの種類との対応

先頭 1 バイト	メッセージの種類
1	測定要求メッセージ
2	受信信号強度報告メッセージ

ターゲットからセンサへのメッセージ



センサからシンクへのメッセージ

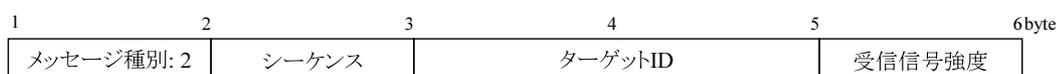


図 5: パケットのフォーマット

本システムにおいて、位置推定を行うまでの流れを説明する。

1. ターゲットはセンサへ、一定間隔で測定要求メッセージを送信する。送信はブロードキャストで行う。
2. センサは測定要求メッセージを受信すると、そのパケットを受信した際の受信信号強度を測定する。受信信号強度があらかじめ設定した閾値を上回った場合に、ターゲットの ID および測定要求メッセージのシーケンス値をシンクへと送信する。
3. シンクではターゲットの ID およびシーケンス値、センサの ID および受信信号強度を収集し、RS-232C を経由してパソコンへデータを送信する。パソコン上で動作するプログラムでは、ターゲットの ID とシーケンス値が同一であるデータが 3 つ以上収集できれば、ターゲットの現在位置を推定することが可能である。その場合に計算を行い、ターゲットの位置を画面へと表示する。

## 4 システムの実験と評価

前章にて説明したセンサネットワークにおける位置推定システムを構築し、実際に実験を行った。まず、位置推定を行うために必要な基礎データとして、受信信号強度と距離についての測定を行い、それらの関係についての近似式を求めた。

### 4.1 受信信号強度と距離の関係の測定

受信信号強度と距離の関係式を求めるために、環境の異なる2箇所で測定実験を行った。測定は大阪大学大学院情報科学研究科棟6階の廊下、および会議室で行った。

測定に利用したシステムは位置推定システムとほぼ同様であるが、センサにおいて距離や位置の推定を行わず、受信した受信信号強度の値のみを収集、表示するようにした点が異なっている。図6にこのシステムの概要を示す。

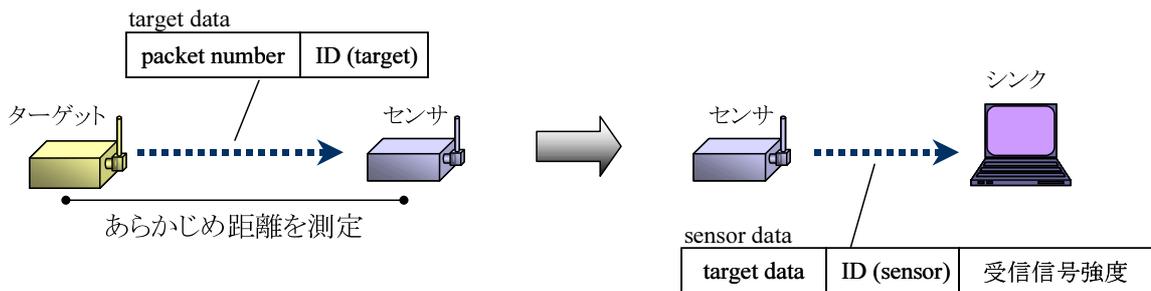


図 6: 受信信号強度と距離を測定するシステムの概要

ターゲットからセンサへ送信するパケットのサイズは33バイトである。このうち、ヘッダは31バイトであり、ペイロードはパケット種別、シーケンス値がそれぞれ1バイトずつからなる。ターゲットのIDとして、ヘッダ中に含まれる送信元MACアドレスの下位2バイトを利用した。

測定環境についての説明を行う。廊下では、ターゲット、センサはともに床面に直接設置して測定を行った。会議室では、ターゲット、センサは地上より70cmの高さの机の上に置き、測定を行った。廊下での測定は午後3時から行い、会議室での測定は午後8時から行った。ユビキタスデバイスが利用している2.4GHz帯は、無線LANなどの多くの機器で利用されており、通常の業務時間内ではそれらの影響を受ける恐れがある。そこで、できるだけ他のシステムからの電波干渉を避けるために、夜間の測定を行なった。

ターゲットとセンサ間の距離を変化させながら，ターゲットからパケットを送信し，センサで得られた受信信号強度の値をシンクにて収集した．一つの位置において測定は10回繰り返し行い，その平均値を受信信号強度の測定値とした．これらの測定値から，最小二乗法を用いて近似式を決定した．測定の様子を図7，図8に示す．測定結果を図9，図10に示す．測定の結果，距離を  $x$  m, 受信信号強度を  $y$  dBm とすると，廊下では，

$$y = -8.93 \ln(x) - 51.6 \quad (12)$$

会議室では，

$$y = -13.3 \ln(x) - 47.0 \quad (13)$$

と近似されることが分かった．これらの近似式について，受信信号強度  $y$  dBm と受信電力  $P$  mW との関係が，

$$P = 10^{y/10} \quad (14)$$

であることを利用して変換すると，廊下では，

$$P = 0.0000069r^{-2.06} \quad (15)$$

会議室では，

$$P = 0.000020r^{-3.10} \quad (16)$$

となった．平均受信電力は通信距離の  $-2.06$  乗 (廊下) と  $-3.10$  乗 (会議室) に比例して減衰することがわかった．

## 4.2 位置推定システム

前章にて説明した位置推定システムを構築し，実験を行った．実験は前節と同様に，本大学内の会議室にて行った．測定時間は前節と同様の理由のため，午後8時から行った．会議室は横7.08m，縦10.60mの長方形の部屋であり，この室内にある地上より70cmの机の上にセンサを20台設置した．また位置推定の対象となる場所は，この室内より6ヶ所を選んだ．それらのセンサおよび推定対象の位置を図11に示す．また，この実験を行っている様子を図12に示す．

前章で述べたように，データ収集の対象となるノードを，ターゲットからの距離で制限するために，受信信号強度の閾値を設ける．この閾値を変化させることで，データを収集する個数を変化させることができるようになる．すなわち，ある閾値より大きな受信信号強度を検出したセンサノードからのデータのみを収集する．したがって，閾値を大きくすれば



図 7: 廊下での測定



図 8: 会議室での測定

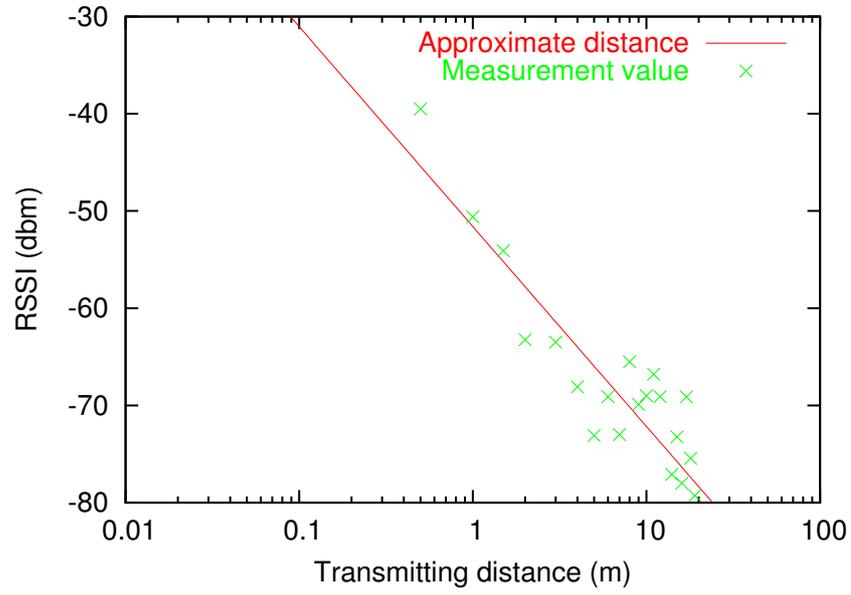


図 9: 廊下での測定結果

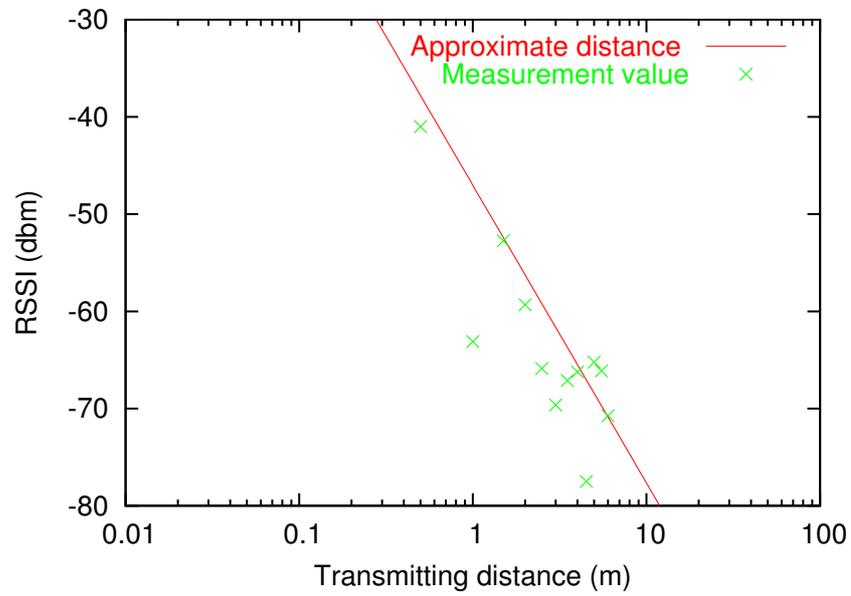


図 10: 会議室での測定結果

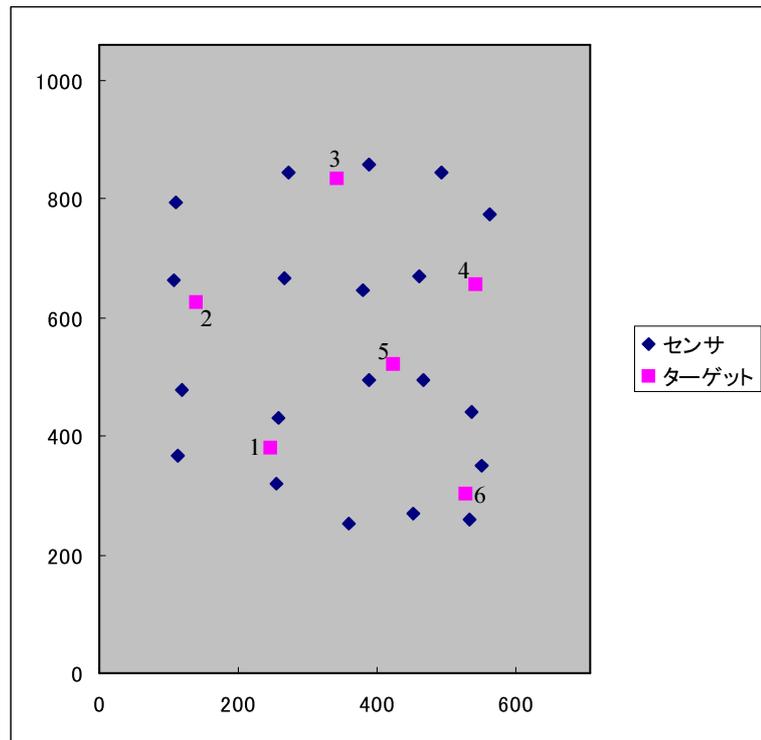


図 11: 会議室へのセンサの配置

データ数は少なくなり、閾値を小さくすればより遠くのセンサからのデータを収集するため、データ数が増える。

受信信号強度の閾値について、式 (11) を用いると、このシステムにおいて収集したいデータの個数  $n$  と、ターゲットとセンサ間のセンサ間の距離の上限  $d$  について求めることができる。さらに式 (13) を用いることで、 $d$  に対応する受信信号強度の値  $F$  について求められる。これらの関係を、表 4 に示す。受信信号強度の閾値は、デバイスの制約により整数値でのみあらわすことができるので、この結果より、 $-58\text{dBm}$  から  $-65\text{dBm}$  まで変化させて収集することとした。これらの閾値と、データの収集予定個数との関係を表 5 に示す。

測定方法については以下の通りである。まず、全センサに同一の閾値を設定する。ターゲットを位置推定の対象とする場所へ設置し、ターゲットから測定要求メッセージを送信する。シンクにてセンサからの受信信号強度報告メッセージが 3 つ以上集まれば位置推定を行う。測定要求メッセージは 1 秒間隔で 5 回送信し、それぞれで推定した位置を平均し、その値を記録する。この測定を、受信信号強度の閾値を変化させながらくりかえす。

データの収集予定個数と、実際に収集できたデータの個数の平均値との関係を図 13 に示



図 12: 会議室での位置推定実験

表 4: 収集したいデータの個数と受信信号強度の閾値の関係

$n$	$d$	$F$	$n$	$d$	$F$
5	2.43	-58.8	9	3.28	-62.8
6	2.68	-60.1	10	3.46	-63.5
7	2.89	-61.2	11	3.63	-64.2
8	3.09	-62.0	12	3.79	-64.7

す。閾値を下げるにしたがってデータの収集個数は増えていくが、データの収集個数は理論値ほどには増えていない。このことの原因としては、以下のものが考えられる。

- IEEE802.15.4 では CSMA/CA の再送を 5 回までとしており、それ以上の再送は試みないためにパケットが消失する可能性
- デバイスの受信バッファの溢れなど、ハードウェアの制約が存在する可能性

次に、データの収集予定個数と、推定位置と実際の位置との誤差の関係を図 14 に示す。結果は推定対象の位置により異なるが、位置 4 を除くと、収集予定個数が 7 個程度までで最も良い推定結果となり、それ以上収集予定個数を増やすと、結果が悪くなるか、推定結果が良くならないという結果が得られた。

表 5: 受信信号強度の閾値とデータの収集予定個数の関係

$F$	$n$	$F$	$n$
-58	4.4	-62	7.9
-59	5.1	-63	9.2
-60	5.9	-64	10.7
-61	6.8	-65	12.5

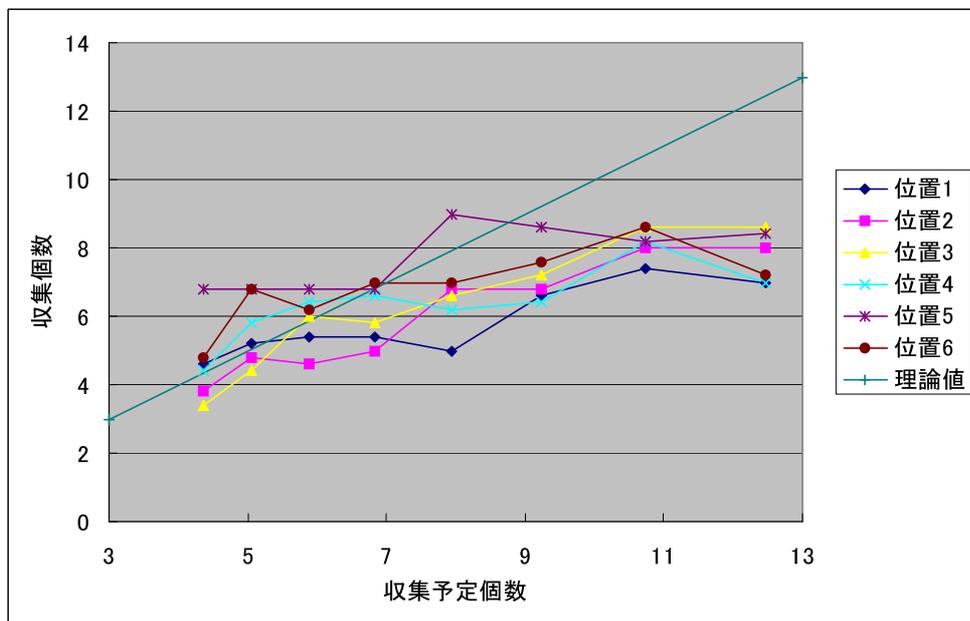


図 13: 受信信号強度と収集個数の関係

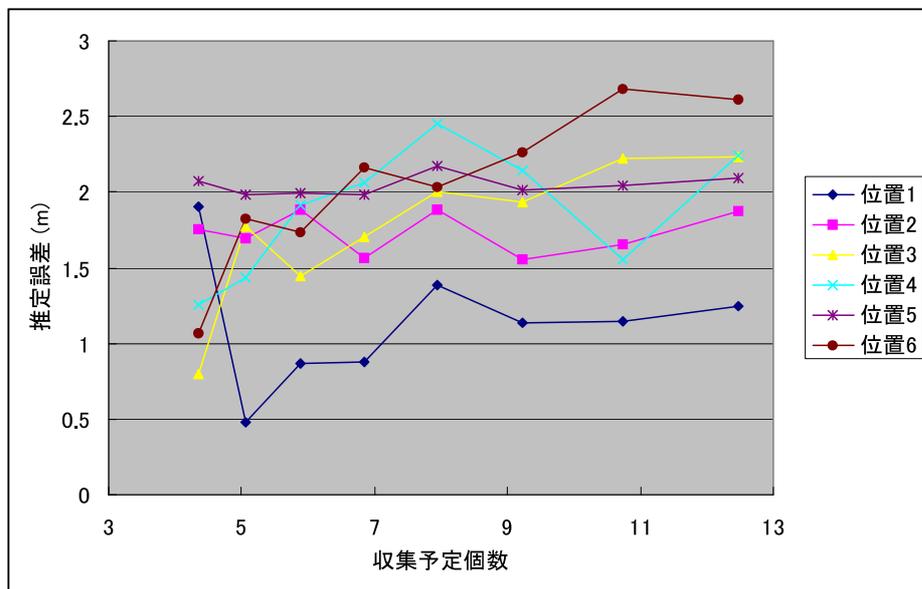


図 14: 受信信号強度と推定精度の関係

## 5 おわりに

本報告では、ZigBee に準拠したセンサネットワークを利用し、受信信号強度を用いて位置推定を行うシステムを構築し、実験を行った。センサの受信電波強度に閾値を設けて、データを収集するセンサを制限する方式を実装したところ、必要以上に収集データ数を増しても精度は向上せず、逆に劣化する傾向があることが示された。そして、室内環境において、センサの配置密度を  $0.27$  個/ $m^2$  とした場合は、位置推定誤差を  $1.5\text{--}2\text{m}$  にできることが明らかとなった。

今後の課題としては以下のことが考えられる。まず、本報告で行った実験においては、センサがデータを送信する際の受信信号強度の閾値は固定的に設定したが、この閾値をセンサにおいて自律的に決定するように拡張するように実装を行いたい。各センサが自身の位置を知らせるパケットを定期的送信することで、各センサは自センサの周囲にどの程度の密度でセンサが存在するかを得ることができる。得られたセンサ密度と、式 (11) および収集予定のデータ個数から、各センサは受信信号強度の閾値を自律的に定めることができる。この方式であれば、長時間の運用によってセンサの電池が消耗するなどして一部のノードが応答しなくなるなど、センサ密度に変化が起った場合にも自律的に対応が可能である。

さらに、センサノードを設置した際に、固定ノード間で通信を行ない、距離と受信電力の関係を測定することで、自動的に係数を取得できるような仕組みを持たせることで、より実用的な位置検出システムを構築できると考えられる。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり，御指導，ご教授を頂いた大阪大学 大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします。また，本報告において直接御指導いただいた大阪府立看護大学の菅野正嗣助教授には終始丁寧に御指導いただきました。心から感謝いたします。並びに，平素から適切な助言を頂きました大阪大学 大学院情報科学研究科の若宮直樹助教授，大阪大学 大学院情報科学研究科の牧一之進助手，大阪大学 サイバーメディアセンターの長谷川剛助教授，大阪大学 大学院経済学研究科の荒川伸一助手，大阪大学 サイバーメディアセンターの笹部昌弘助手に深く感謝いたします。最後に，本報告においてご協力いただきました太田義和氏，橋本雅和氏をはじめとする村田研究室の皆様方に心からお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102–114, Aug. 2002.
- [2] A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Strivastava, “Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 166–179, July 2001.
- [3] Y. Xu, J. S. Heidemann, and D. Estrin, “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing,” in *Proceedings of the 7th International Conference Mobile Computing and Networking*, pp. 70–84, 2001.
- [4] E. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, 1996.
- [5] A. Harter and A. Hooper, “A new location technique for the active office,” *IEEE Personal Communications*, vol. 4, pp. 42–47, Oct. 1997.
- [6] Y. Gwon, R. Jain, and T. Kawahara, “Robust indoor location estimation of stationary and mobile users,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2004*, Mar. 2004.
- [7] N. Patwari and A. O. H. III, “Using proximity and quantized RSS for sensor,” in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 20–29, Sept. 2003.
- [8] 太田 義和, 菅野 正嗣, 村田 正幸, “センサネットワークにおける位置測定のためのデータ収集方式の提案,” 電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2004-104), pp. 31–36, Nov. 2004.
- [9] “CC2420 Data Sheet.” available at [http://www.chipcon.com/files/CC2420\\_Data\\_Sheet\\_1\\_2.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_2.pdf).
- [10] “ZigBee Alliance.” available at <http://www.zigbee.org/>.
- [11] 福井 潔, 谷本 晃一, 福永 茂, “Zigbeeって何だ?,” 電子情報通信学会誌, vol. 88, no. 1, pp. 40–45, 2005.
- [12] 市川 武志, 谷本 晃一, “次世代近距離無線ネットワークを実現する ZigBee LSI,” 沖テクニカルレビュー, vol. 71, pp. 70–73, Oct. 2004.