

# 無線センサネットワークを利用した位置測位システムの構築

越智博之† 田頭茂明† 藤田 聡†

†広島大学 大学院工学研究科 情報工学専攻  
〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1

## 概要

ユビキタスコンピューティング環境における重要な課題のひとつに、実空間におけるヒトやモノの位置情報を如何にして正確に把握するかという問題がある。本稿では、無線通信機能を搭載した微小なデバイスたちからなるセンサネットワークを対象とし、ある領域に分散された各センサノードが、外部から与えられる情報をもとに、自身の位置情報を自律的に獲得していくための新しい手法の提案と評価を行なう。

## A Localization System for Wireless Sensor Networks

Hiroyuki OCHI† Shigeaki TAGASHIRA† Satoshi FUJITA†

†Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering,  
Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan

## Abstract

In this paper, we propose a new localization scheme for wireless sensor networks, consisting of a huge number of sensor nodes equipped with wireless communication devices such as wireless LAN and Bluetooth. The proposed scheme is based on the PIT algorithm proposed by He *et al.* in 2003. The proposed scheme is actually implemented by using Bluetooth devices, and its performance is evaluated in a real environment.

## 1 はじめに

近年のネットワーク技術の急速な進歩に伴い、ユビキタス環境における“実空間情報に基づいた新しいネットワークサービスの実現”が強く期待されている。また、コンピュータネットワーク上に構築される論理的な空間の中にヒトやモノに関する実空間情報を取り込むための方法のひとつとして、センサノードやICタグに代表される“無線通信機能を搭載した微小なデバイス”を利用する方法が近年高い注目を集めている。そのような微小なセンサノードが大量に散布された系における重要な問題のひとつに、各センサノードに対してどのようにして正確な位置情報を配布するかとい

う問題がある [1]<sup>1</sup>。本稿では、ある領域に分散された各センサノードが、外部から与えられる情報をもとに、自身の位置情報を自律的に獲得していくための新しい手法の提案と評価を行なう。

提案手法は、文献 [2] で提案された PIT アルゴリズムをベースとしている。PIT アルゴリズムは、自身の正確な位置情報をもった特定のデバイス (例えば GPS 衛星など) との間の正確な距離や方向などに依存しない、いわゆる Range-Free 型の位置測位方式のひとつ

<sup>1</sup> デジタルミュージアムや食品トレーサビリティ店舗のように、そのデバイスが近くに存在する (もしくはそのデバイスに書き込まれた情報が読み取れる) という事自体が意味をもつような場合にはこのことはあまり大きな問題にはならないが、特定のアプリケーションを特定の場所で起動したい場合などには、センサノードの保有している位置情報の正確さが非常に重要になってくる。

であり、GPS(Global Positioning System)などで利用されている Range-Based 型の方式に比べて、より少ないハードウェアコストと消費電力で位置測位が行なえるという利点がある。我々は提案方式を Bluetooth を用いて実装し、その性能を実環境で実験的に評価した。実験の結果、提案方式を用いることで、Class 2 の Bluetooth デバイスを用いた場合に、2メートル以内の誤差で正しく位置測位が行なえることがあきらかとなった。この結果は、既存手法 [2] を用いた場合に比べて 25%~65%の改善になっている。また収集した情報から位置を推定するために必要な計算量もあわせて評価したところ、提案手法による計算量の増分は、既存手法に要する計算量の 1%未満であることもあきらかとなった。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 節で関連研究について述べる。続いて 3 節で提案する位置測定手法について述べ、4 節で提案手法を実装した位置測定システムの概要を示す。実装したシステム上で行なわれた実験の結果は 5 節で示される。最後に 6 節で今後の課題等について述べる。

## 2 関連研究

無線通信を利用した位置測位システムでは、各デバイス(以下、ノードと呼ぶ)の位置測定が、自身の正確な位置情報を持っている特別なデバイス(以下、アンカーと呼ぶ)と直接通信を行なうことで実現される。アンカーは携帯電話の基地局のようなものであってもよいし、人工衛星等によって実現される場合もありうる。これまでに数多くの位置測位手法が提案・実装されているが、それらの多くは、以下に述べる Range-Based 方式と Range-Free 方式とに大別することができる。

### 2.1 Range-Based 位置測位方式

Range-Based 位置測位方式では、アンカーとの距離や方向を信号伝搬時間や信号強度などによって正確に測定し、その測定結果に基づいて、ノードの現在位置の推定が行われる。信号伝播時間情報(TOA: Time of Arrival)に基づく代表的な位置測位システムのひとつに、カーナビゲーションシステムなどで広く用いられている GPS(Global Positioning System)がある。一方、信号強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)に基づくシステムの例としては、RADAR[3]や SpotON[4]などが知られている。これらのシステムでは、測定された RSSI 値から、理論的・経験的に構

築されたモデルに従って自ノードとアンカーとの距離や方向が推定され、その結果に基づいて、ノードの現在位置の推定が行われる。

一般に Range-Based 方式では位置測位を高精度に行うことができるが、測位のために専用のハードウェアを必要とする上、これらのハードウェア上で多大の電力を消費するとするという問題点がある [2]。これらの問題点は、センサノードのようにチップサイズやバッテリー容量の限られた微少なデバイスなどでは特に重大な欠点となる可能性が高い。

### 2.2 Range-Free 位置測位方式

Range-Free 位置測位方式では、Range-Based 方式とは対照的に、ノードの現在位置の推定が、アンカーとの正確な距離や方向を測定することなく行なわれる。この方式で主に利用されるのは、アンカーとの送受信記録や RSSI 値の変化などである。これまでに、複数のアンカーと通信することで位置測定を行なう APIT アルゴリズム [2] や Centroid アルゴリズム [5] などが提案されている。

Range-Free 方式に必要なものは、基本的には電波の送受信機能のみであるので、Range-Based 方式に比べてより低コスト・低消費電力で位置測位を行なうことができる。本稿では、センサーネットワークという対象の特殊性から、Range-Free 方式に基づいた位置測位システムの提案と評価を行っていく。

## 3 提案手法

本稿で提案する位置測位方式は、文献 [2] で提案された PIT テストに基づいている(PIT テストの詳細については 3.1 節で述べる)。PIT テストの目的は、観測点に置かれたノードが 3 台のアンカーによって構成される三角形の内部にいるかどうかを、各アンカーからの信号強度の変化に基づいて判定することである<sup>2</sup>。空間内に配置された複数のアンカーたちによって構成される三角形のそれぞれについて PIT テストを行うことで、ノードの現在位置を精度よく求めることが可能となる。

提案手法のキーポイントは以下の 2 点である:

- PIT テストを近似的に実現する新たな方法の提案

<sup>2</sup>ここで、PIT テストで利用しているのはアンカーまでの距離と測定される RSSI 値との間の“相関関係”のみであり、各アンカーまでの具体的な距離を RSSI 値から算出しているのではないことに留意されたい。

- 複数の PIT テストの結果を統合し、ノードの現在位置を精度よく推定するための新たな位置推定手法の提案

以下では、PIT テストの概要について説明した後、上記の各ポイントについて詳細に説明する。

### 3.1 PIT テスト

3 台のアンカー  $A, B, C$  が空間内で三角形を構成しているものと仮定する。PIT テストの基本的なアイデアは、観測点  $M$  が  $\triangle ABC$  の内部にある場合と外部にある場合とで、観測点の空間的な変位に対する RSSI 値の変化の仕方が異なることに注目することである。具体的には、以下の命題を利用する [2]：

命題 1 もし観測点  $M$  が  $\triangle ABC$  の外部にあれば、すべてのアンカー  $A, B, C$  に関してその位置が近づくか遠ざかるかするような観測点の変位の方向が、少なくともひとつは存在する。またもし点  $M$  が  $\triangle ABC$  の内部に存在すれば、そのような方向は存在しない。

現実の環境で測定を行う場合には「すべての」方向に対して調べることは不可能であるから、調べた範囲内でそのような方向が存在しないからといって、その点が三角形の内部に存在しているとは限らないことに注意されたい(一方、そのような方向がひとつでも見つければ、三角形の外部に存在していることを正しく判定できる)。3.2 節で詳しく述べるように、提案手法ではそのような観測点の変位を、アンカーの変位によって仮想的に代替させるという方法をとっている。

### 3.2 PIT テストの近似的な実現

以下では、PIT テストを近似的に実現するための新たな方法について述べる。複数のアンカーからなるアンカーグループを考える。グループの中心に位置するアンカーを中心アンカー (C アンカー) と呼び、それ以外のアンカーを周辺アンカー (P アンカー) と呼ぶ。提案手法では、このようなアンカーグループが一体となって空間内の様々なポイントにお互いの角度を保ったまま移動し、各ポイントから、そのポイントの位置情報と RSSI 測定命令とを含んだ信号をポイント周辺のノードたちに送信する。アンカーグループの位置は、C アンカーの位置で代表させる。すなわちこの方式では、C アンカーが PIT テストにおけるアンカーに対応し、P アンカーたちが観測点の変位に仮想的に対応していることになる。またアンカーグループが送信を

行うポイントは、与えられた空間の形状などから、あらかじめ計算しておくことができる(ひとつの方法は、与えられた空間の境界線上のポイントを適当な間隔で選択していく方法である)。

提案手法でアンカーグループを陽に構成し、それらを一体として移動させている理由は、通常の無線環境では、送受信者の位置が固定されていたとしても、受信信号の RSSI 値が短時間で大きく変化してしまうことがあるからである。すなわち P アンカーによって観測点の変位を正しく模倣するためには、それらを C アンカーとは別のデバイスとして実現して、C アンカーとほぼ同時刻に信号を送れるようにする必要がある。その一方で、PIT テストにおける複数のアンカーたちからの情報発信が、必ずしも同時に行われる必要がないことにも注意されたい。実際提案手法では、空間内に分散配置された複数のアンカーたちの役割を、単一のアンカーグループが空間内を時間をかけて移動することで実現している。

上記のような特徴から、提案手法では既存手法 [2] に比べてアンカーに対して余分に負担をかけてはいるものの、アンカーの送信スケジュールをうまく制御することで、十分高い精度の位置測位が行えるようになる可能性がある。

### 3.3 改良型 SCAN アルゴリズム

次に、複数の(近似)PIT テストの結果から観測点の位置を推定する手法について述べる。この手法は [2] で提案された SCAN アルゴリズムをベースとしている。SCAN の基本的なアイデアは、与えられた空間を 2 次元のセル状に分割し、ある三角形がその観測点を内部に含むと判定されたとき、その三角形に対応するすべてのセルのスコアを 1 ずつ増やす、という処理をすべての三角形について実行することである。最終的にもっとも高いスコアをもつセルの重心点が、観測点の推定値として出力される。ここで各セルの最終的なスコアが、三角形の個数に対応していることに注意されたい。そのため多くの三角形が重なり合っているセルでは、実際の包含関係とは無関係に、高いスコアが出やすい傾向にあるという問題点がある。

これに対して提案手法では、セルのスコアとして、“そのセルに対応する三角形の総数” に対する “その観測点を内部に含む三角形数” の割合を用いている。ただしこのようにすると、対応する三角形の絶対数が少ないセルではノイズの影響を受けやすくなるため、そのような影響を可能な限り排除するために、最高のス

コアをもつセルを特定する前にメディアフィルタをかけるという手法をとっている<sup>3</sup>。

提案アルゴリズムの具体的な手順は次の通りである：

#### 改良型 SCAN アルゴリズム

1. 領域を 2 次元セル状に分割する。
2. 各セル  $c_i$  に対して、そのセルに対応する三角形の総数をあらわす変数  $tri[i]$  と、その観測点を内部に含む三角形の数をあらわす変数  $inside\_tri[i]$  の値をそれぞれ 0 に初期化する。
3. PIT テストを行なったすべての三角形について、1) 三角形と重なるセル  $c_j$  の  $tri[j]$  に 1 を加え、2) もし自身がその三角形の内部であると判定された場合は  $inside\_tri[j]$  に 1 を加える。
4. 各セル  $c_i$  に対して、 $tri[i] = 0$  のとき  $inside\_per[i] = 0$  とし、それ以外るとき  $inside\_per[i] = inside\_tri[i]/tri[i]$  とする。
5. 二次元データ  $inside\_per$  に対してメディアフィルタをかける。
6. 最も  $inside\_per$  の大きなセルの重心点を  $M$  の位置として出力する。

## 4 提案システムの実装

### 4.1 ハードウェア

前節で提案した位置測位手法を、Class 2 の Bluetooth デバイス [6] を用いて実装した。Bluetooth デバイスはそれぞれ固有の識別子 (BD\_ADDR) を持っており、したがって本実装では、各ノードがアンカーグループに属しているすべてのアンカーを識別子によって区別できることを前提としている。

アンカーグループの構成は以下の通りである。アンカーグループは、C アンカーと、それを 4 方から囲む 4 つの P アンカーとによって構成され、各アンカーはそれぞれ Bluetooth デバイスによって実現される (C アンカーと各 P アンカーとの物理的な距離は、5.1 節での予備実験の結果を踏まえて決定する)。システム構成を図 1 に示す。制御用ノートパソコンの USB ポートに、C アンカーにあたる Bluetooth デバイスと USB

<sup>3</sup>メディアフィルタ処理とは、画像処理や信号処理の分野で用いられているノイズ除去の一般的な手法のひとつであり、ある点の値とその近傍の点の値を昇順にソートし、その中央値を自身の新しい値とするというものである。

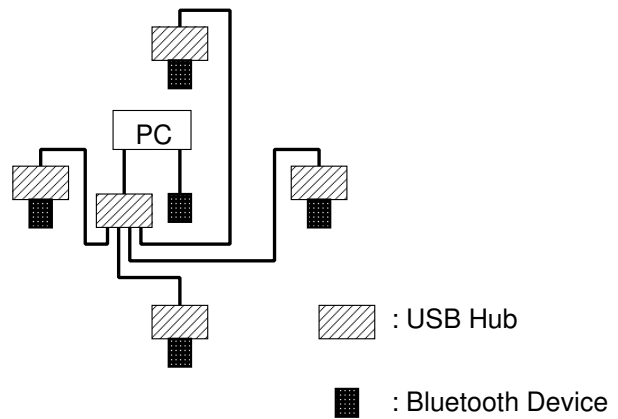


図 1: アンカーグループのシステム構成。

ハブとを USB ケーブルを用いてそれぞれ接続し、P アンカーにあたる Bluetooth デバイスとの通信は、この USB ハブを介して行うこととした。

観測点に配置されるノードには、ノートパソコンに接続された Bluetooth デバイスを用いた。計算機の基本性能は下記の通りである：CPU Pentium II 300MHz、Memory 256MB。

### 4.2 動作手順

まず処理全体は、各ノードからアンカーグループに対して送られる位置情報送信要求によって開始される。アンカーグループ中の各アンカーは、次の送信ポイントに到達すると、C アンカーの位置情報と RSSI 測定命令とを含んだ信号を各ノードに向けて送信する。各ノードはこの信号を受信し、アンカーグループ内のすべてのアンカーの RSSI 値を個別に測定し、記録する。この一連の処理は、すべてのノードからの位置情報送信停止要求がアンカーグループによって受理されるまで、繰り返し実行される。

各ノードが観測した RSSI 値は、表 1 のような形式で記録される。表の第 1 列には C アンカーの位置情報が記録され、第 2~5 列には、各 P アンカーからの RSSI 値が C アンカーの RSSI 値に比べて大きくなっているときは 1、小さくなっている場合には 0 がそれぞれ書き込まれる (同一の P アンカーからの RSSI 値がすべて同一の列に書き込まれることに注意されたい)。また表の各列は、それぞれアンカーグループの送信ポイントに対応している。

位置情報送信停止要求がアンカーグループによって受理された後、各ノードは、自分自身が記録した表の

表 1: 位置と RSSI の関係表 .

C アンカーの 位置	RSSI			
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
( , )				
( , )				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
( , )				

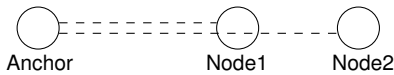


図 2: 予備実験環境 .

すべての 3 つの行の組み合わせに対して PIT テストを行なう . 具体的には , 3 つの行の第  $i$  列 ( $i = 2, 3, 4, 5$ ) の値がすべて 1 もしくはすべて 0 であるような  $i$  が存在するとき , 観測点はその 3 行で規定される三角形の外部にあると判定され , それ以外の場合にはその三角形の内部にあると判定される . 判定結果からの現在位置の推定は , 3.3 節で述べた改良型 SCAN アルゴリズムを用いて行われる . ただしここでは処理を軽くするため , メディアンフィルタ処理には [7] で提案された簡易な手法を利用している .

## 5 実験

### 5.1 予備実験

まずはじめに , C アンカーと P アンカーとの距離を決めるための予備実験を行なった . アンカーを基点とする半直線上に , ノード 1 と ノード 2 をこの順に配置する (図 2 参照) . このような環境で , P アンカーが C アンカーからどの程度離れていれば , RSSI の変化による距離変化の検出が正しく行えるのかを調べた . 具体的な実験方法は以下の通りである :

- アンカーからノード 1 までの距離を , 3m から 9m まで 1m 刻みで変化させる
- ノード 1 と ノード 2 の距離を 1m から 4m まで 1m 刻みで変化させる (ノード 1 が C アンカーからの信号を , ノード 2 が P アンカーからの信号をそれぞれ受信している状況に対応している)
- RSSI 値の測定を 0.1 秒間隔で 10 回行い , その平

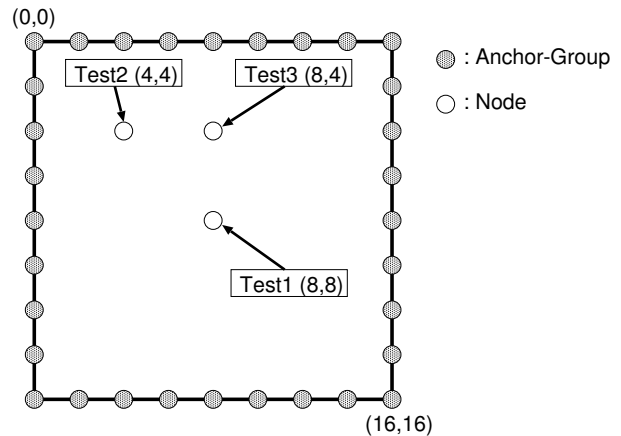


図 3: 位置測位実験のための環境 .

均をとったものを測定値とする

以上の実験をそれぞれ 100 回ずつ行ない , ノード 1 で観測した RSSI 値がノード 2 で観測した RSSI 値を (正しく) 上回った回数を調べた .

実験の結果 , ノード 1 と ノード 2 が 1m 以上離れていれば , アンカーとノード 1 の距離が 3m から 9m までのいずれの場合においても , 96% 以上の確率で RSSI 値の変化が正しく測定されることがわかった . この結果を踏まえて , 以下の実験では , C アンカーと各 P アンカーとの距離を 1.5m に設定することとする .

### 5.2 位置測位実験

次に , 図 3 に示す環境で位置測位実験を行なった . 実験では , (近似)PIT テストの結果から観測点の位置を推定するための方法として , SCAN[2] と提案手法を使った場合のそれぞれについて , 推定の精度と推定完了までに要した時間とを評価した . この環境は 1 辺 16m の正方形をしており , 実験は本学工学部 A1 棟 (8 階建て) の屋上で行われた .

アンカーグループは 1 辺 16m の正方形の辺上を  $(0,0) \rightarrow (2,0) \rightarrow \dots \rightarrow (16,0) \rightarrow \dots \rightarrow (16,16) \rightarrow \dots \rightarrow (0,16) \rightarrow \dots \rightarrow (0,2)$  のように 2m ずつ移動し ,  $(0,0)$  に戻った時点で移動を終了させる . またノードは  $(8,8)$  ,  $(4,4)$  ,  $(8,4)$  の 3 点に置かれ , 各ポイントで個別に位置測位が行なわれる . 各ポイントにおける位置測位はそれぞれ 5 回の試行からなり , 1 回の試行は , 次のような形で行なわれる :

- RSSI 値は , 0.1 秒間隔で 10 回測定した値の平均とする

表 2: 平均誤差 [m].

	(8,8)	(4,4)	(8,4)
SCAN	1.06	4.26	3.34
提案手法	0.78	1.46	1.70

表 3: 平均計算時間 [sec].

	(8,8)	(4,4)	(8,4)
SCAN	11.03	11.04	11.03
提案手法	11.12	11.10	11.13

- 位置の推定方式としては, SCAN[2] と提案方式をそれぞれ用いる
- 各推定アルゴリズムで用いるセルの大きさは, 0.5m×0.5m とする

結果を表 2 と表 3 に示す. 表 2 には 5 回の試行で得られた推定結果の平均誤差が示されている. 表からもわかるように, SCAN の代わりに提案手法を用いることで, 領域の中心部分で約 25 パーセント, 領域の周辺部分では約 65 パーセントの誤差の減少が確認された. 一方, 位置の推定に要する平均計算時間は表 3 のようになった. 単純な加算のみをおこなう SCAN に比べると 1 パーセント程度余分に時間がかかっているが, 達成される精度の向上に比べて十分小さな増加で抑えられていることがわかる. なお今回の実験では, アンカーグループからの信号受信がすべて終了してからノードの位置推定を開始しているが, 実際には, 信号を受信している途中でも, すでに取得しているデータを使って計算を部分的に進めていくことができる. そのような方法を併用することで, 各ノードでの計算時間はさらに短縮できると考えられる.

## 6 まとめ

本研究では, センサネットワークのための位置測位問題に着目し, PIT アルゴリズムに基づいた新しい位置測位アルゴリズムの提案と評価を行なった. 提案手法は Bluetooth を用いて実装され, その性能は実環境で実験的に評価された. 実験の結果, 既存の位置推定手法の代わりに提案する位置推定手法を用いることで, 測位誤差が 25% ~ 65% 減少することがあきらかとなった. また推定をおこなうための計算時間も, 既存手法

とほぼ同じに保たれていることが確かめられた.

今後の課題としては, アンカーグループのスケジューリングが測位性能に与える影響について, 定量的に評価することがあげられる (今回の実験で得られた測位誤差が, アンカーグループが 2m 間隔で移動していることに強く依存している可能性がある). またこれらの知見を生かすことで, 与えられた空間の形状や面積などから, アンカーグループの移動スケジュールを必要とされる分解能に応じて生成することが可能になってくると期待される.

## 参考文献

- [1] 平澤一樹, 南正輝, 横山成昭, 水町守志, 森川博之, 青山友紀. 自律分散型屋内測位システムの実装と評価. 情報処理学会 モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 第 29 回研究報告会, pp.13-18, 2004 年 5 月.
- [2] Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, John A. Stankovic, Tarek Abdelzaher. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. *Mobicom*, 2003.
- [3] P.Bahl and V.N.Padmanabhan. An in-building rf-based user location and tracking system. *In Proceedings of the IEEE INFOCOM '00*, March 2000.
- [4] J.Hightower, G.Boriello and R.Want. SpotON: An indoor 3d location sensing technology based on rf signal strength. *University of Washington CSE Report #2000-02-02*, February 2000.
- [5] N.Bulusu, J.Heidemann and D.Estrin. Gps-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine* 7(5):28-34, October 2000.
- [6] Bluetooth: The Official Bluetooth Website. <http://www.bluetooth.com/>.
- [7] 浜村倫行, 入江文平. 3 × 3 メディアンフィルタの高速アルゴリズム. *Forum on Information Technology*, 2002.