

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

太田 義和[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪府立看護大学総合リハビリテーション学部 〒583-8555 羽曳野市羽曳野 3-7-30

E-mail: †{yosi-ota,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††sugano@osaka-hsu.ac.jp

あらまし センサネットワークでは、移動するターゲットから発信されるシグナルを受信し、電波強度からターゲットとセンサ間の距離を見積もることで位置推定を行う。センサ周囲にある様々な要因のため測定した距離には誤差が含まれることとなり、推定する位置も実際の位置と異なる。まず、本稿ではある精度を得るために必要なセンサ数を導出する。システムの稼働時間を延ばすためには、各センサの消費電力を抑える必要がでてくる。そのため、必要最小限のセンサからデータを効率よく収集することが重要である。そこで本研究では、センサの配置が不規則な場合でも、位置推定に必要なデータを効率よく収集することができる方式を提案し、センサがランダムに配置されている場合やシャドウイングを考えた場合でもデータ収集が行えているか検証する。

キーワード 位置推定, 受信電波強度, データ収集法, 最小二乗平均推定 (MMSE)

A Data Collecting Technique for Localization in Wireless Sensor Networks

Yoshikazu OHTA[†], Masashi SUGANO^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

^{††} Faculty of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture College of Nursing 3-7-30, Habikino, Habikino, Osaka, 583-8555 Japan

E-mail: †{yosi-ota,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††sugano@osaka-hsu.ac.jp

Abstract In wireless sensor networks, localization systems use data from sensors which receive signals from moving targets, measure RSSI, and translate RSSI into the distance between sensor and target. We consider a localization system that gives error measurement model of distance and introduce a relationship between the number of data and accuracy. Extending the lifetime of a system is needed to save the energy of sensors and collect the necessary data. In this paper, we propose an efficient data collecting technique to get the accuracy required for the applications while saving energy. We verify our proposal can efficiently collect necessary data to get accuracy in case of sensor randomly placement and influence of shadowing in simulation.

Key words Localization, RSSI, Data Collecting, Minimum Mean Square Estimate (MMSE)

1. はじめに

近年の技術革新により、無線通信機能と計算機能を有した小型センサの開発が行われるようになった。このような小型センサ(センサノード)を数百、数千の単位で協調動作させて情報収集を行うセンサネットワークの研究が行われている。大量のセンサノードを配置することによって、大規模な情報収集を可能にし、環境モニタリング(大気、水質、土壌など)など様々な分野に応用できる。また、ユビキタスコンピューティング環境

において、ユーザの状況に適応できるコンテキストウェア・アプリケーションに対してセンサデータを提供することも可能である[1]。各センサノードは自律的に動作し、温度、湿度、光量などを測定する。取得したデータ(センサデータ)は、無線は使用してシンクノードへ転送される[2]。

センサのコストが下がり、センサが大量に配置されるようになれば、ユーザの現在の位置に依存したサービスの利用が可能となり、ユーザの周囲のサービスの検索なども考えられるからである。そのため位置情報取得のためのセンサシステムは重要

な位置を占めてくる．位置情報の取得では GPS [3] が有名だが，GPS は衛星からの電波を受信して動作するために屋内ではうまく動かない．そのため，衛星に代わりセンサネットワークを利用することで室内での位置推定が可能となる [4]．今後，位置情報を必要とするナビゲーションシステムやターゲットの追跡システム（例，スーパーマーケットや展示場での客の移動軌跡の記録）などの需要は多くなると予想される．水質調査，震度，気温など環境をセンシングするアプリケーションでは，センサの位置が分からないデータは意味が無いために，センサの位置も重要となる [5] [6]．

位置情報取得のために，超音波やレーザーを使用する方法は高精度を得られるが，デバイスのサイズ，費用，電力消費を増大させることとなる．よって，大量のセンサを扱うセンサネットワークには不適合である．そのために，安価でセンサをあまり変更する必要のない無線の電波強度による測定を使用した方法が研究されている [5]．しかし，電波強度から距離を測定する場合には，無線の伝播路による影響が大きいために，測定の誤差が大きい．WINS ノードによる電波強度測定では，最大 4m の誤差が生じたのに対して，超音波計測を用いる Medusa ノードでは，最大 2cm の誤差となる [6]．しかし，Medusa の測定可能距離が 3m に対して，WINS など電波強度によって測定するセンサでは，無線の通信可能範囲なら測定が可能であるというメリットがある．また，電波強度による測定では誤差が大きいため，他の測定方法と比べると多くのセンサからデータを集めないと良い精度は得られない．しかし，必要以上のセンサからデータを集めることはトラフィック量が増加し，各センサの消費電力を増大させるため，センサネットワークの寿命が短くなってしまふ．さらに，位置推定に必要なデータを収集するために必要な時間も増加するため，データ取得のリアルタイム性が損なわれる．

本稿では，センサネットワークにおいて，電波強度を利用した距離推定に基づき，移動する対象物の位置を測定する方法を提案する．必要なデータ数は，アプリケーションの要求，センサの配置，位置計算のアルゴリズム，測定誤差に依存するため，データ数，距離測定誤差，アルゴリズムには密接な関係がある．本論文では，RSSI と MMSE [6] を使った場合の位置推定での精度とデータ数の関係をシミュレーションにより明らかにする．実環境では，消費電力の観点から，目標とする位置推定精度を得るために必要なセンサのみからデータを収集することが望ましく，また，位置推定の誤差はデータ数に比例して小さくはならない．そこで，本論文では，不均一にセンサが配置されている場合でも，センサ自身が周囲に配置されているセンサ数を互いに認識し，自律分散的に必要なセンサを決定するための方法を提案する．本提案方式の有効性を示すために，シミュレーション実験による評価を行なう．

本論文の構成は，以下ようになる．2 章では，センサを使った位置推定についての関連する研究を述べる．3 章では，本論文で考えているセンサによる位置推定システムの説明．4 章では，シミュレーションによりセンサ数と精度の関係を示し，問題点を述べる．5 章では，提案手法とその評価を行う．最後に，

6 章で本論文のまとめと今後の課題を述べる．

2. 関連研究

屋内の位置推定システムはすでいくつか提案されている．RADAR システムは，受信電波強度地図を作るために測定領域の様々な地点で基点となるノードからの受信電波強度を測定する必要がある [7]．ユーザは，受信電波強度地図を用いて，受信した電波強度に最も近い電波強度を示す点を位置として推定する．そのために，位置推定の精度は，あらかじめどれだけ多くの地点で電波強度を測定したかに依存する．また，超音波センサを利用した ActiveBAT システムは，室内での位置推定で高い精度を得ることが可能である [8]．ActiveBAT は特定の超音波センサに特化してつくられており，他のセンサの利用は考慮に入れていない．したがって，アプリケーションは ActiveBat に依存した形で構築する必要がある．

超音波デバイスを用いたセンサで，センサ自身の位置を求める研究も行われている [6]．このシステムでは，センサが移動しない場合，そのセンサの位置を高い精度で推定する方法を提案している．しかし，想定している超音波の測定可能距離は 3m しかないためにある程度の密度を持ったネットワークでないと効果が期待できない．文献 [5] では，無線通信での減衰の原因の調査と Quantized RSS (QRSS) という測定法の提案を行っている．QRSS は，通常電波強度による測定と比べ単純な回路で実現でき，センサの低コスト化を図ることができる．他に，受信電波強度による距離測定 (RSSI) と受信時間差による距離測定 (TOA) それぞれについて，実際に位置推定システムを実装して評価しているものもある [9]．屋内では，障害物の影響があるために屋外での位置推定よりも結果が悪くなる．また，RSSI より TOA の方がどちらの場合も，よい性能を示す．文献 [10] では，位置が分かっているデバイスをビーコンと呼び，ビーコンを用いて位置が分からないデバイスの位置を推定するシステムを考え，ビーコンの配置問題を議論している．結果として，グリッドに配置した場合が最も良い性能を示したが，ビーコンの配置は位置推定のアルゴリズムにも依存する問題であると述べられている．

3. 位置推定システムのモデル

本稿では，1-2ms で移動しているターゲットの位置を推定することを想定している．ターゲットは，小型の無線端末を持ち，一定間隔ごとにパケットを送信する．複数のターゲットがエリア内に存在する場合には，ターゲットごとの ID をパケットに含める必要がある．パケットを受信したセンサは，そのパケットの受信電波強度から距離を見積もり，結果をシンクへと送信する．シンクでは，集めたデータからターゲットの位置を求める．ターゲットがセンサからデータを集め，位置を計算する可能性もある．しかし，ターゲットでは，計算能力が低いために大量のデータを収集することはできない．位置推定システムは以下の 3 つの過程により構成される．

- センサの配置

すべてのセンサは配置後移動しないものとする．そのため，各

センサの位置は、一度決定するだけでよい。センサの位置を知る方法を2つあり、1つはセンサを配置することにデータベースに登録する方法である。シンクでは、センサのIDから位置が検索可能となる。また、センサがその位置を知る必要があるならシンクがブロードキャストすればよい。この方法は、少数のセンサを規則的に並べる場合には使うことができるが、大量のセンサをランダムに配置する場合には、登録に時間がかかってしまうという問題がある。そのため、もう1つの方法として、位置が分かっているビーコンをあらかじめ配置しておき、センサの位置をビーコンからの情報を利用して求めるというものがある[6]。

- データの収集

センサはターゲットからパケットを受信し、その受信電波強度を計った後、電波強度と距離の関係から電波強度の距離への変換を行う。電波強度と距離の関係は、あらかじめに減衰の影響を測定し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

シンクでは、集めたデータの中からターゲットIDとパケットの番号が同じデータを使用して、ターゲットの位置を計算する。本稿では、位置推定に測定結果に最も近い位置を推定するMaximum Likelihood (ML) を使用する (figure 3.)。

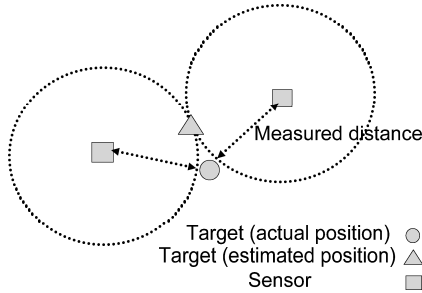


図1 位置推定アルゴリズム: ML

実際にターゲットの位置を計算するためには Minimum Mean Square Error (MMSE) を使用する citelocation. 以下、2次元の場合の MMSE による計算方法を紹介します。まず、 i 番目のセンサが測定した距離と推定する距離との違いを式 (1) で定義する。

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

(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、 $i = 1, 2, 3, \dots, k$ 。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。3次元座標 (x_0, y_0, z_0)

を求める場合には、4つのデータが必要となる。 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、解を得るために $(x_0^2 + y_0^2)$ 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。

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

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

X, y, b は以下に定義する。

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

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

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

4. 位置推定システムの精度

4.1 誤差モデル

電波強度による測定は、マルチパスや送受信センサの固体差などによる影響により誤差を伴う。シミュレーションを行うために、3つの誤差モデルについて定義する。すべてのモデルでは、正規分布などに比べ分散が大きい一様分布を仮定している。

(1) 測定誤差は、ターゲットとセンサの距離に比例する。このモデルでは、文献 citelocation の実験結果に基づき、平均値が距離の10%なる正規分布を用いる。

(2) 測定誤差は、距離とは無関係に常に平均1mの正規分布。この仮定は、近いセンサがアンテナの性能や障害物などのために必ずしも正確に距離を測定できないために用いている。

(3) (1),(2)の上限を取ったモデル。このモデルにより想定する最大の誤差を与えたときにシステムが正確に動作することを示す。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションは、縦横それぞれ100mの領域でターゲットをランダムに発生させ、ターゲットから距離20m以内のセンサのデータを用いて位置推定を行っている。図4.2??はグリッド、ランダムそれぞれの配置方法について、位置推定の平均誤差と配置したセンサ数の関係を示している。誤差モデル(1),(3)に比べ(2)では、位置推定誤差が小さくなっている。また、モデル(1)は、ターゲットに近いセンサの誤差は最小であるにも関わらず、位置推定誤差は、モデル(3)とほぼ同じとなっている。これらのことから位置推定では、誤差が大きいデータがある場合、著しく精度が減少することが分かる。また、図の左端

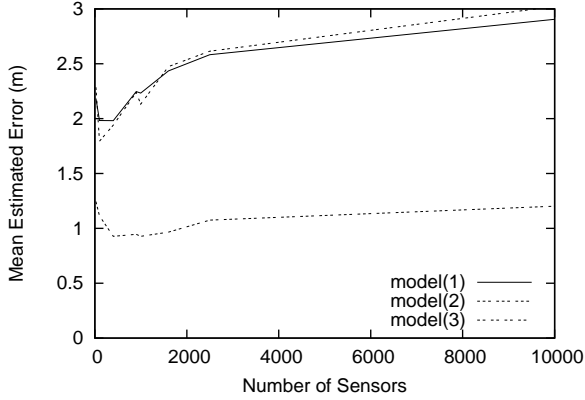


図 2 グリッド: 平均位置推定誤差とセンサ数の関係

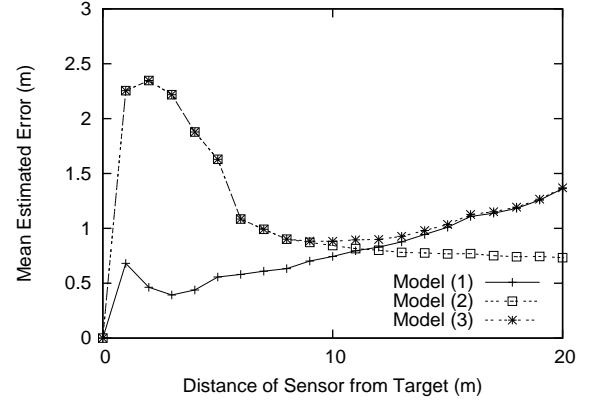


図 4 収集するセンサを距離で制限した場合の平均位置推定誤差

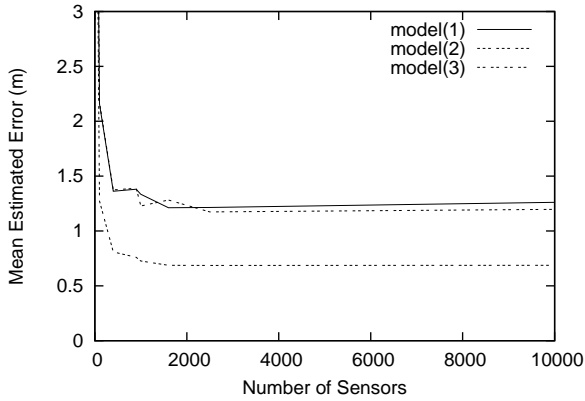


図 3 ランダム: 平均位置推定誤差とセンサ数の関係

のセンサ数が少ない所では、センサ数を増やすことで精度を向上させることができるが、ある程度センサ数が多くなるとそれ以上増やしても精度は良くならない。このことから、位置推定の誤差を最小にするデータ数が存在し、それ以上のデータを集めても誤差は小さくならないと考えられる。

センサ数を増やすことで収集するデータは多くなるが、位置推定の誤差はセンサ数に比例して減少しない。このことには、2つの原因が考えられる。理由の1つは、MMSEでの計算はそれほど多くのデータを必要としないこと。もう一つの理由は、センサ数が多い場合には、ターゲットから遠く誤差が大きいセンサからデータを多く収集すること。次章では、電力消費を抑え、精度の良いデータを集めるために各センサが自立的にデータをシンクへと送信する必要があるか否かを判断するメカニズムを提案する。

5. データ収集法

5.1 データ数と精度の関係

まず、データ数、センサ・ターゲット間距離、位置推定精度の3つの関係を明らかにするために、計算に使用するデータを制限することを考える。具体的には、ターゲットからある距離以上離れたセンサはデータをシンクへと送らない、この距離を変化させることでデータ数を減らす。センサ数 1000 のときのターゲットから距離を制限したときの位置推定誤差を図 5.1 に示す。モデル (1) と (3) では、距離を制限しデータ数を減らす

ことで、位置推定誤差が減少している。また、それぞれのモデルの位置推定誤差を最小にするような最適なデータ数が存在していることが分かる。一方、モデル (2) では、データを多く集める方が精度が良くなるという結果を示しているが、ある範囲内ならデータ数を減少させても精度は大きく損なわれないことが分かる。センサが均一に配置されているようなネットワークでは距離で制限することも可能だが、センサの配置に偏りがある場合には場所によりデータが収集できず位置推定が行えない、もしくは、多くデータを集めすぎるためにセンサが無駄に電力を消費するなど問題が起こる。

5.2 提案手法

収集するデータ数を決定することで、各センサが自律的に必要なデータを送信するための機構を説明する。まず、ユーザは要求する精度を満たすように収集するデータ数を決定し、シンクからのブロードキャストなどによってセンサへ知らせる。ターゲットが送信するパケットに収集すべきデータ数を含めることでも、センサへ知らせることができる。この機構では、収集するデータ数をいつでも変更可能なため、ユーザが精度を得るためにデータ数が不足していると判断すれば、いつでも収集するデータを増やすことができる。

提案する機構では、各センサがデータを送るかの判断は、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。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。周囲のセンサ数から密度は、式 (9) で定義することができる。\$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。

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

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。

表 1 2つの手法の比較

	Proposal system whose number of data is 10		Collecting data from sensors within 6m radius	
	Error	Data	Error	Data
(25,25)	0.982	9.48	0.513	29.87
(25,75)	1.082	10.63	1.065	6.73
(75,25)	0.665	13.05	2.181	4.54
(75,75)	0.818	11.52	3.501	3.79

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

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 に依存して決定するために、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。

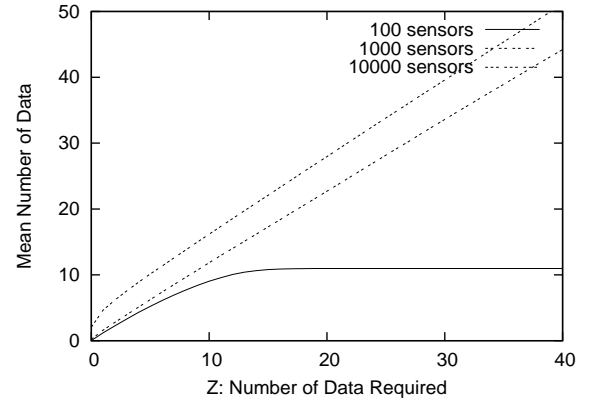
5.3 データ収集法の評価

シミュレーションの設定は、4.2 と同じである。エラーモデル (3) でセンサをランダムに配置しているものの結果だけを示す。図 5(a) は、位置推定誤差と収集すべきデータ数 Z との関係を示している。センサ数 100 の場合には、ターゲットから 20m 以内に 10 個しかセンサが存在しないために、それ以上にはならない。また、領域の端では、密度を実際よりも小さく見積もり不必要に多くのデータを送信するために、収集したデータ数が Z よりも多くなってしまふ。センサ数が 1000 と 10,000 のとき、データ数が 10 まではデータ数を増やすことで位置推定誤差が小さくなっているが、それ以上増やしても誤差はほとんど変化しない (図 5(b))。

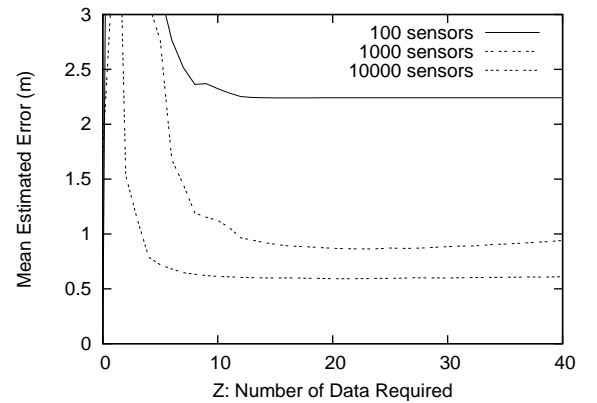
次に、センサの配置に偏りのあるトポロジーでデータ収集法の評価を行うため、縦横 100m の領域を 4 分割し、左下に 700 センサを配置し、残りの 3 つにそれぞれ 100 センサずつ配置したトポロジー (図 5) を生成し、提案したデータ収集法と距離で制限する方法 (5.1 の方法) との比較を行う。提案手法は収集すべきデータとして 10 を利用し、距離で制限する方法は、ターゲットから 6m 以内のセンサのデータを利用した場合、これまでシミュレーションに使用していたセンサの配置が均一なトポロジーでは、ほぼ同じ誤差で同じデータ数収集していた。しかし、図 5 のトポロジーでは、提案手法は常に要求されるデータ数を収集し、位置推定の誤差も一定だが、距離で制限した場合、左下のセンサが密集した位置では、誤差は小さいもの意図した以上のデータを集め、また、センサの密度が小さい位置では収集したデータが少ないために十分な精度が得られていない (表 1)。これらの結果より、提案手法を用いることでどのようなトポロジーでも安定してデータを収集でき、各センサの消費電力を抑えることが分かる。

5.4 シャドウイングの影響

測定を行う領域がオフィスなどの場合、壁やパーティション



(a) 収集したデータ数と要求されたデータ数の比較



(b) 提案手法による平均位置推定誤差

図 5 データ収集法の性能

など障害物の影響で近距離でも電波が受信できない可能性があるため、シャドウイングの影響について考える。ターゲットからのパケットが障害物の影響でセンサに届かない場合があるので、障害物が無い場合に比べ収集するデータ数は減少する。このような影響がある場合でも、提案手法は設定されたデータ数だけデータを収集することができることを理論とシミュレーションから示す。

P_s をシャドウイングの起こる確率として定義すると、各センサは周囲の密度を $M_i(1 - P_s)/\pi R^2$ と小さく見積もることになる。各センサがデータを送信するか判断するための距離 D'_i を式 (12) で定義する。

$$D'_i = R \sqrt{\frac{Z \frac{1}{1 - P_s}}{M_i}} \quad (12)$$

式 (12) は、 $Z \frac{1}{1 - P_s}$ のセンサがデータ得るとシンクへと送ることを表している。しかし、センサがターゲットから電波を受信する確率は $1 - P_s$ であるために、結局収集されるデータの期待値は式 (13) で表される。センサがシンクへとデータを送る際には、障害物があってもマルチホップで迂回することが可能なので、常に届くものと考えている。

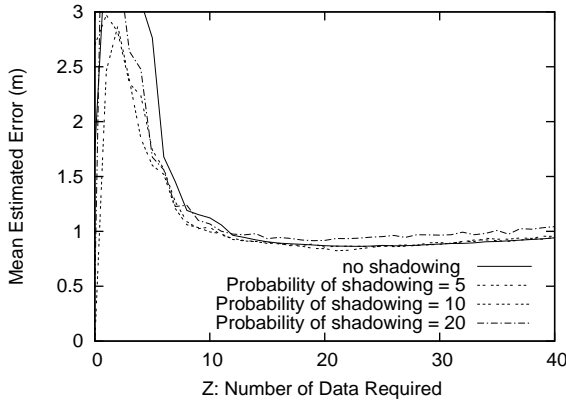


図 6 シャドウイングが位置推定誤差に及ぼす影響

$$Z \frac{1}{1 - P_s} \times (1 - P_s) = Z \quad (13)$$

結果として、シャドウイングの影響がある場合もシンクは平均 Z のデータを収集することができる。センサ数が 1000 のときに障害物がデータ収集と位置推定の精度にどのように影響するかについて、シミュレーションによる評価を行う。図には示していないが、収集したデータ数はシャドウイングの影響を受けず、常に要求されるデータ数を収集しており、理論的な考察が正しいことを証明している。位置推定誤差に対する影響は、図 6 示す。 Z が 10 よりも大きい時ほとんど同じ誤差を示していたが、 P_s が大きいほど誤差も大きくなっている。これは、同数のデータを集めているものの、シャドウイングの影響が大きいほどターゲットから遠いセンサからデータを収集するので、誤差も大きくなっているためである。そのため、 P_s が大きくなれば、位置推定誤差も大きくなることは避けられない。

6. まとめと今後の課題

本稿では、無線センサを用いた電波強度による距離測定を利用した位置推定システムについて述べ、データ数と位置推定精度、センサの配置の関係を議論した。シミュレーションの結果は、高い位置推定精度を得るために大量のデータが必要では無いことを示し、本稿では各センサが周囲の密度から必要なデータだけを収集する方法を提案した。提案手法は、どのようなトポロジーでも収集するデータ数を調整でき、必要なデータだけを収集することができ、センサネットワークの消費電力を減少させる。今回の位置推定システムの実環境への適応は今後の課題として残っている。また、今回は大量のセンサが配置されることを仮定していたが、少数センサから成るセンサネットワークでも正確に位置推定が行えるような機構を考える必要がある。

文 献

- [1] M. Murase, "Self-organizing dynamic sensor placement scheme for mobile sensor networks," Master's thesis, Keio University, 2002.
- [2] 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.
- [3] E. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, 1996.
- [4] Y. Gwon, R. Jain, and T. Kawahara, "Robust indoor loca-

tion estimation of stationary and mobile users," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2004*, Mar. 2004.

- [5] N. Patwari and A. O. Hero III, "Using proximity and quantized RSS for sensor," in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, Sept. 2003.
- [6] 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, 2001.
- [7] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, pp. 775–784, 2000.
- [8] A. Harter and A. Hooper, "A new location technique for the active office," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, pp. 42–47, Oct. 1997.
- [9] N. Patwari, A. O. Hero III, M. Perkins, N. S. Correal and R. J. O'Dea, "Relative location estimation in wireless sensor networks," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 51, pp. 2137–2148, Aug. 2003.
- [10] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Adaptive beacon placement," in *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-21)*, Apr. 2001.