

透過減衰を考慮した無線ホームネットワーク向け位置推定

畠 中 理 英^{†1} 達 可 敏 充^{†1}
渡 邊 賢 治^{†1} 尾 上 孝 雄^{†1}

IEEE 802.15.4 を用いた無線ホームネットワーク向けネットワークプロトコルが提案されている。ホームネットワークにおいて、機器の位置情報を取得することができれば、さまざまなサービスが提供可能となる。本研究では無線ホームネットワークに導入する位置推定手法が満たすべき必要条件を検討し、それらの条件をすべて満たす位置推定手法を提案する。本手法では *RSSI* (*Received Signal Strength Indication*) と最尤法を用いて位置推定を行う。受信電力に大きく影響する部屋間の壁に着目し、ノードの推定位置と位置が既知のノード間の壁の状況に応じて利用する自由度関数を適宜変更することで、一般家庭環境に対応する。さらに、最尤法に必要な確率密度関数を自動取得することでユーザ負担を軽減させる。本手法を実装した評価ボードにより位置推定実験を行った結果得られた推定誤差は 1.39 m となった。これにより、本手法は部屋ごとのユーザの位置に応じたサービス提供に有効であるといえる。

Location Estimation with Transmission Attenuation in Home Network

MASAHIDE HATANAKA,^{†1} TOSHIMITSU TATSUKA,^{†1}
KENJI WATANABE^{†1} and TAKAO ONOYE^{†1}

There is a network protocol based on IEEE 802.15.4, which is designed in consideration of requirements and features of the wireless home network. In home networks, location estimation of home appliances can provide various services. This paper examines requirements of the location estimation method for utilization in wireless home network, and then proposes the location estimation method which satisfies all of the requirements. This method estimates the location of node by maximum likelihood estimation which uses Received Signal Strength Indication (*RSSI*). A set of likelihood functions are used appropriately according to obstruction condition between the target node and nodes with known location in order to utilize it in houses with several rooms. Automatic acquisition of probability density function which is used in location estimation process is also introduced aiming at high usability. A location

estimation experiment is performed using evaluation board. As a result, the estimation error is 1.39 m, and this method is effective in the service based on the position of the user in each room.

1. ま え が き

近年、より安全で便利な生活への要求や無線技術の向上、ユビキタスネットワーク技術の発展にともない、ホームネットワークへの関心が高まっている。ホームネットワークとは、家庭の電気機器により構築されたネットワークであり、各家電機器が連携することで従来にない新しいサービスの提供が可能となる。ホームネットワークにおいては導入コストの低さやモビリティが重要となるため、配線が必要となる有線通信よりも無線通信が適している。こうした背景より無線ホームネットワーク向けネットワーク (NWK) 層プロトコルの設計、実装が行われている^{1),2)}。本プロトコルでは物理/MAC 層として近距離無線通信規格である IEEE802.15.4³⁾ を使用している。

一方で、アンビエントネットワーク⁴⁾ という、ユーザの状況を的確に理解し最適な環境・サービスを提供するネットワーク環境が、次世代 IT の活用環境として期待されている。この概念を無線ホームネットワークに取り入れられれば、家電機器が連携してユーザの行動を監視し、その行動状況から必要とされるサービスの推定・提供や、ユーザの行動に異変がある場合の、他のユーザへの自動異常通知などが可能となる。家電機器にこのような機能を追加する場合、ユーザやネットワーク内の他の機器の位置情報の取得機能が必須である。

無線 LAN やセンサネットワークにおいては、受信電波強度 (*RSSI*: Received Signal Strength Indication) やそれから求められる受信電力の減衰量から、ノード間距離を算出することによりノード位置を推定する位置推定手法⁵⁾⁻⁸⁾ や、受信信号の伝搬特性の情報に基づく位置指紋 (Location Fingerprint) を用いた位置推定手法⁸⁾⁻¹²⁾ が提案されている。

無線ホームネットワークに位置推定機構を導入する場合、

- (1) 新たな専用機器の追加が必要であるなど、無線ホームネットワークへの導入コストが低い、
- (2) 推定対象領域が壁やドアなどにより複数の部屋に分かれている、一般家庭環境に対応

^{†1} 大阪大学
Osaka University

している,

- (3) 運用上のユーザの負担が少ない,
の3つの条件を満たすことが望ましい。

前述の位置指紋を用いた手法では, 事前に位置が既知の端末で位置指紋となりうるパラメータを取得し構築したデータベースと, 位置が未知の端末の観測地とのパターンマッチングにより位置を決定している. この手法ではデータベースの参照点間距離が小さければ, 高い位置推定精度を達成できることが示されているが¹²⁾, データベースの構築へのユーザ負担が大きくなるため, ホームネットワークへの適用には課題が残る. そこで本研究では, *RSSI* や受信電力の減衰量からノード間距離を算出する位置推定手法を対象とする.

一般に, 受信電力および *RSSI* はノード間距離が近いほど高く, 遠いほど低くなる. しかしながら, 反射や雑音など, 距離以外の要因によっても減衰するため, たとえ同じ距離であっても, 環境によって値が大きく変化してしまう. これに対し, ノード間の障害物などによるマルチパスフェージングなどの無線伝播特性が受信電力に与える影響が確率分布を用いてモデル化できることを利用し, この確率モデルから最尤法を用いて統計的推定を行う⁵⁾, 電波伝搬特性の局所的な違いを考慮する⁶⁾, 確率伝搬を考慮する⁷⁾, などにより推定精度を向上させる手法が提案されている. これらの手法は主にオフィスでのマンロケーション管理などを対象としたものであり, 単一の矩形領域に多数のノードが存在する, という前提条件のもとで研究が進められている.

一方, 一般家庭環境では, 推定対象領域が壁やドアなどにより複数の部屋に分かれていることが多く, また *RSSI* はノード間の壁の数1枚につき約4dB減少することが報告されている¹³⁾. この4dBの差は, 既存手法における推定誤差に換算すると2m以上に相当する. また, 部屋ごとに位置推定を行おうとした場合でも, それぞれの部屋における位置が既知のノード数が推定に最低必要なノード数(3ノード)に満たず, 推定処理が行えないことがある. このように文献5)–7)で提案されている手法は無線ホームネットワークへの導入には不向きであるといえる.

RADAR (RF-based system for locating and tracking users inside buildings) と呼ばれる屋内向け位置推定システム⁸⁾では, こうした壁による受信強度の減衰を考慮した無線伝播モデルを用い, 信号空間でのユークリッド距離を比較することにより位置推定を行っている. しかしながら, 本手法の適用は, 無線伝播モデルの構築のために推定領域内での位置, および端末の向きを変更しながら受信強度を測定したデータが多数必要となる. このため, 家庭環境での使用を考えた場合, 新たな機器の導入のたびにデータセット取得を行う必要が

あり, システム運用上のユーザの負担が大きくなってしまう.

以上の手法では, 推定精度が改善されている, 複数の部屋に分割されている一般家庭環境に対応している, などそれぞれに長所は存在するが, 前述のホームネットワーク導入のための3条件すべてを満たしているわけではない.

このように, 前述の3つすべての条件を満たす位置推定手法が, 無線ホームネットワークにおける位置推定機構の普及には必要不可欠である.

そこで, 本研究では文献5)の確率モデルと最尤法を用いることによる精度改善と, 文献8)の壁による受信強度の減衰を考慮することによる一般家庭環境への対応というそれぞれの長所を組み合わせ, さらに, 最尤法に必要な確率密度関数の自動取得機構を追加することにより, 無線ホームネットワークへの導入のための3条件すべてを満たす位置推定手法を提案する.

以下, 2章で既存の位置推定手法について述べる. 3章で本研究で提案する無線ホームネットワーク向け位置推定システムについて述べ, 4章でその性能評価を行い, 最後に5章で結論を述べる.

2. 既存手法

センサネットワークや無線LAN環境において, さまざまな位置推定手法が提案されている. 本論文では, 受信電力や *RSSI* の確率密度と最尤法を用いた位置推定手法⁵⁾, ならびにRADAR⁸⁾について述べる.

2.1 受信電力や *RSSI* の確率モデルと最尤法を用いた位置推定⁵⁾

前述のように受信電力は, ノード間の距離が近いほど高く, 遠いほど低くなるため, 受信電力から送受信ノード間の距離を推定することは可能である. しかしながら, 距離以外にもマルチパスフェージングなど受信電力に影響する要因は多くあり, ノード間距離が同じである場合でも受信電力が大きく変動する. ここで, 無線伝播特性が受信電力に与える影響は確率分布を用いてモデル化できることが知られているため, 確率モデルを作成し, 最尤法を用いて統計的推定を行う手法が提案されている⁵⁾.

この手法では, 推定処理を行う前には, 推定対象領域内での距離を適宜変更しながら受信電力を測定することにより, 距離 r に対する受信電力 P の確率密度関数 $p(P|r)$ を導出しておく必要がある.

以下に本手法を用いた推定手順を示す.

- (1) 推定対象となるノードと位置が既知のノード間の受信電力 P_i (i : 位置が既知ノード

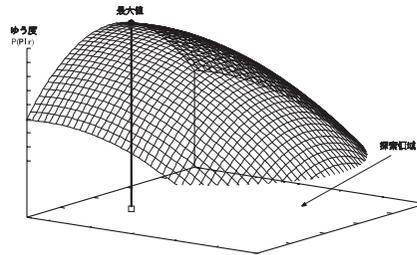


図 1 最ゆう推定例

Fig. 1 An example of location estimation using maximum likelihood estimation method.

のインデックス)を取得する。

- (2) 事前に求めた $p(P|r)$ を用いて、位置が既知のノード i における受信電力 P_i の確率密度関数 $p(P_i|r_i)$ を得る。
- (3) 推定対象ノードと位置が既知の各ノード間の伝搬路が独立であると仮定し、

$$p(\mathbf{P}|\mathbf{r}) = \prod_{i=1}^n p(P_i|r_i)$$

が最大となる点を推定位置とする。ただし、 n は位置が既知のノードの数を示す。

図 1 に最ゆう推定の一例を示す。これは、推定対象領域内の各点においてゆう度 $p(\mathbf{P}|\mathbf{r})$ を求めプロットしたものである。この例では図中の でゆう度が最大となり、この点を推定点としている。また、矩形領域において、机などの障害物が存在する場合や、人の移動がある場合でも良好な推定結果が得られることが、実験により示されている。

2.2 RADAR (RF-based system for locating and tracking users inside buildings)⁸⁾

本システムでは、ユーザ端末が定期的にビーコン信号を発信し、その信号を受信した 3 つ (4 つ以上でもよい) の受信機で計測された受信電力を用いてユーザ端末の位置を推定している。また、推定方法として、(a) あらかじめ対象エリアの各地点にユーザが存在する場合の受信電力を記録しておき、それらと比較して最も近いと思われる場所を推定位置とする方法と、(b) 無線伝播モデルを用いて得られる受信強度と比較し、最も近いと思われる場所を推定位置とする方法、の 2 種類提案している。いずれの方法も信号空間のユークリッド距離を用いて比較を行っている。

(a) についてはあらかじめ測定する地点数が多いほど、その推定精度は向上する

表 1 既存手法の評価

Table 1 Evaluation of traditional methods.

	(1)	(2)	(3)
最ゆう法		×	×
RADAR			×

が、推定対象地点ごとに、その座標 (x,y) とユーザの向き (4 方向) ごとの受信電力を得る必要があるため、ユーザの負担が大きい、という欠点がある。

(b) については、以下の式 (1) で示される WAF (Wall Attenuation Factor) モデルという電波伝搬モデルを用いている。

$$P(d) = P(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - nW * WAF \tag{1}$$

ただし、

d : 送受信するノード間の距離

$P(d)$: 距離 d における受信電力 [dBm]

d_0 : 基準距離

$P(d_0)$: 基準距離での受信電力 [dBm]

nW : ノード間の障害物の数

WAF : 障害物 1 つあたりの減衰量 [dBm]

である。

本モデルに必要なパスロス指数や壁を通過するごとに減衰するデシベル値などのパラメータは、(a) と同様に事前に推定領域内での測定により得られたデータから求めるため、(b) においても導入時のユーザ負担は大きいといえる。

2.3 無線ホームネットワーク環境への導入に関する考察

前述のとおり、無線ホームネットワークに位置推定・検出機構を導入する場合、以下の点に考慮する必要がある。

- (1) 新たな専用機器の導入が不要など、無線ホームネットワークへの導入コストが低いこと
- (2) 推定対象領域が壁やドアなどにより複数の部屋に分かれている一般家庭環境に対応していること
- (3) 運用上のユーザの負担が少ないこと

ここで、2.1 節、2.2 節で示した既存手法の上記 3 条件の対応状況を表 1 に示す。

表 1 に示すように、両方式ともに特別な機器の必要がなく得られる受信電力、RSSI を用いた方式であるため、無線ホームネットワークへの導入コストは低く抑えられると考えられる。次に、最ゆう法については単一の矩形領域に多数のノードが存在する、という環境を前提に研究が進められているため、一般の家庭環境では壁による受信電力の減衰により性能が劣化する恐れがある。一方、RADAR については、壁などの障害物による受信強度の減衰を考慮したモデルを用いて位置推定を行っていることから、(2) の条件にも対応しているといえる。しかしながら、両方式とも事前の測定によって得られるデータセットを用いて推定処理を行っているため、(3) の条件を満たしていない。

そこで本研究では、確率モデルと最ゆう法の利用による精度改善と壁による受信強度減衰の考慮による一般家庭環境への対応という両既存手法の長所を組み合わせることに加え、最ゆう法に必要な確率密度関数の自動取得機構を追加することによって、無線ホームネットワークへの導入のための条件 (1)、(2) だけでなく、既存手法が満たしていなかった条件 (3) にも対応する無線ホームネットワーク向け位置推定手法を提案する。

3. 透過減衰を考慮した無線ホームネットワーク向け位置推定

本章では、提案する無線ホームネットワーク導入のための 3 条件をすべて満たす位置推定方式について述べる。

具体的には

- (1) 最ゆう法に基づく障害物の透過減衰を考慮した無線ホームネットワーク向け位置推定
 - (2) 確率密度関数の自動取得
- について述べる。なお、以後の説明ではホームネットワーク上の情報家電などのノードを、以下の 2 種類にクラス分けしているものとする。

- 固定ノード
コンセントにより電源供給されるノードであり、移動がないことを前提としている(例：冷蔵庫、電子レンジ、エアコンなど)
- 移動ノード
電池により電源供給されるノードであり、位置推定の対象となる。

3.1 最ゆう法に基づく障害物の透過減衰を考慮した無線ホームネットワーク向け位置推定

3.1.1 位置推定に使用する確率密度関数の決定

RSSI と最ゆう法を用いて位置推定を行う場合、距離 r に対する RSSI の確率密度関数 $p(RSSI|r)$ が必要となる。

ここで、一般にノード間に壁のような遮蔽物がない場合、遮蔽物以外のさまざまな障害物の影響によって、ノード間の距離が同じであっても RSSI の値が変動することが知られており、このような変動はシャドウイングと呼ばれている。シャドウイングの確率密度関数は式 (2) で与えられる対数正規分布に従うといわれている¹⁴⁾。

$$p(RSSI|r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(RSSI - \overline{RSSI}(r))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ただし、
 RSSI: 受信信号強度
 $\overline{RSSI}(r)$: 受信信号強度の長区間平均値
 σ : $(RSSI - \overline{RSSI}(r))$ の標準偏差
 である。また $\overline{RSSI}(r)$ は一般に以下の形の式で求められ、式中の a 、 b は測定環境により変化する。

$$\overline{RSSI}(r) = a \cdot \log_{10}(r) + b \quad (3)$$

そこで、本研究では壁による透過減衰の影響を受けた受信 RSSI も対数正規分布に従うと想定し、最ゆう法で用いる確率密度関数として正規分布の確率密度関数を使用することを考える。ここで、上記の確率密度関数を使用するためにはノード間の壁の状況を加味しつつに応じた距離 r に対する RSSI の平均値を利用することが必須となるため、本研究では、RADAR⁸⁾ で用いられている WAF モデル(式 (1))と同様に、壁による減衰を示す項を追加した 2 種類の平均 RSSI 導出式を提案する。

(方式 1) 推定位置 - 固定ノード間に存在する壁の枚数による減衰を示す項 $c \cdot w$ (w : 壁の枚数) を追加する。

$$\overline{RSSI}(r) = a \cdot \log_{10}(r) + b - c \cdot w \quad (4)$$

(方式 2) 推定位置 - 固定ノード間に存在する壁の厚みの合計による減衰を示す項 $d \cdot x$ (x : 壁の厚みの合計 (cm)) を追加する。

$$\overline{RSSI}(r) = a \cdot \log_{10}(r) + b - d \cdot x \quad (5)$$

上記 1)、2) のようにノード間の壁の状況を考慮した平均 RSSI 導出式を使用する妥当性を評価する。まず実環境において、ノード間の距離や壁の状況を変化させながら RSSI の測定を行う。次にその測定結果から最小二乗法により得られる、距離 r のときの平均

表 2 *RSSI* 測定条件
Table 2 *RSSI* measurement condition.

条件	方式 1	方式 2
ノード間距離 (m)		0.5 ~ 10.0
測定間隔 (m)		0.5
ノード間の壁の状況	0, 1, 2 (枚)	2.7, 2.9, 3.7, 6.4 (cm)

$RSSI(\overline{RSSI}(r))$ で正規化した $RSSI - \overline{RSSI}$ の確率密度関数を求める。その後、この結果と式 (2) で与えられるシャドウイングの確率密度関数との相関係数を算出した。*RSSI* 測定条件を表 2 に、測定によって得られた確率密度関数を図 2 に示す。なお、×は測定値であり、式 (2) で与えられるシャドウイングの確率密度関数である。

図 2 に示されているとおり、両方式とも非常に高い相関係数が得られた。これによりノード間の壁の状況を考慮した *RSSI* と最ゆう法を用いた位置推定処理で用いる確率密度関数として正規分布の確率密度関数を使用することの妥当性が確認できた。

3.1.2 最ゆう法に基づく無線ホームネットワーク向け位置推定

本項では前項で求めた確率密度関数を利用した、最ゆう法に基づく無線ホームネットワーク向け位置推定手法について詳細を述べる。

なお、

- (1) 部屋の形状
- (2) 各部屋間の壁の枚数
- (3) 固定ノードの設置位置

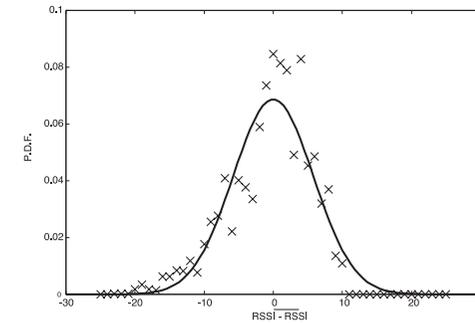
は既知であるとし、以下の説明においては、平均 *RSSI* 導出式も用意されているものとする。

(前準備) 位置推定対象である複数の部屋全体を、複数の矩形領域に分割し、領域番号 (1 ~ N) を割り振る。このとき、位置が既知のノードと領域内のどの地点間の無線通信においても、電波の経路上に存在する壁の最小数が等しくなるように領域を設定する。たとえば図 3 (a) のような壁で 3 つに分割された部屋の場合、A の部分を 3 つに分割し、計 5 つの領域に分割し、1 ~ 5 の領域番号を割り振る (図 3 (b))。

(STEP 0) 推定対象となる移動ノードがブロードキャストしたパケットを各固定ノードが受信し、*RSSI* を得る。

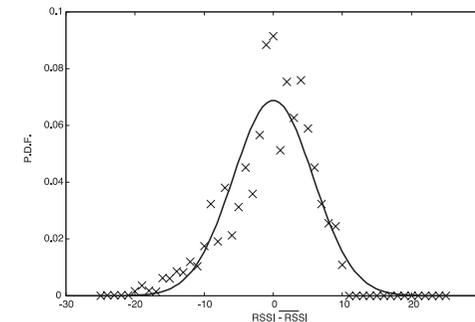
(STEP 1) 各固定ノードは得られた *RSSI* を GW に送信する。

(STEP 2) GW に集められた *RSSI* を用いて、領域 1 において中央点を初期値として、最



相関係数 : 0.945

(1) 方式 1



相関係数 : 0.941

(2) 方式 2

図 2 確率密度関数

Fig. 2 Probability density functions.

急降下法を用いた推定処理を行い、その領域におけるゆう度が最大になる点の座標と、そのゆう度を求める。このとき、領域-固定ノード間の壁の状況に応じた平均 *RSSI* 導出式を用いる。たとえば図 3 右図の領域 1 において、方式 1 で推定処理を行う場合、平均 *RSSI* 導出式中の w を固定ノード a, b に対しては 0、固定ノード c, d については 1 とする。

(STEP 3) 残りすべての領域 (2 ~ N) において同様に推定処理を行い、それぞれ領域におけるゆう度が最大になる点の座標と、そのゆう度を求める。

(STEP 4) 得られたゆう度を領域間で比較し、最大ゆう度を持つ点を推定点とする。

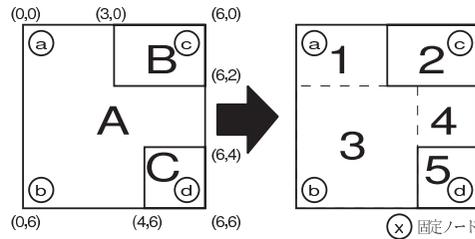


図 3 領域分割例

Fig. 3 An example of area division.

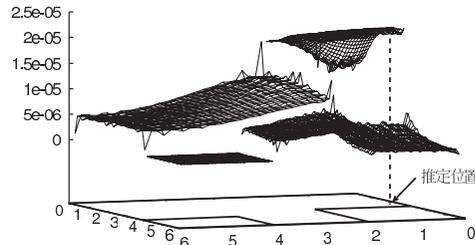


図 4 移動ノードの位置推定例

Fig. 4 Location estimation of mobile node.

図 3 に示す領域数 5, 固定ノード数 4 の条件下における推定処理結果例を図 4 に示す. これは各領域内の各点においてゆう度を求め, プロットしたものである. この例では図中の矢印で示す点においてゆう度が最大となり, この位置を移動ノードの推定位置としている.

ここで, 本研究で既知とした情報の取得方法について考察する. 部屋の形状や各部屋間の枚数に関する情報を測定により取得する場合, ユーザの負担は大きなものとなる. しかしながら, 間取り図や設計図などを手に入れられれば, この負担は大きく軽減できると考えられる. 次に, 固定ノードの設置位置については, ユーザによる測定が前提となるが, 前述のとおり固定ノードはコンセントからの電源供給が前提であるため, エアコンや冷蔵庫などのように, 間取りから位置が得られる場合には, その負担は軽減されると考えられる.

3.2 確率密度関数の自動取得

提案する障害物を考慮した位置推定手法を無線ホームネットワークで利用する場合, 前述のとおり各固定ノードの位置, 各領域の座標情報, 各領域と各固定ノード間の壁の状況, およびノード間の壁の状況に対応する確率密度関数が既知である必要がある. ここで, 本研

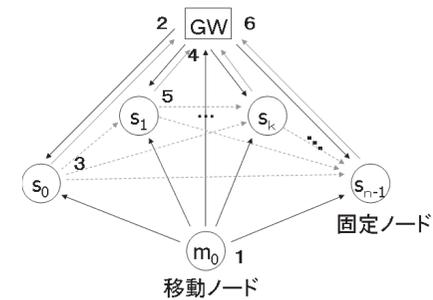


図 5 固定ノード間 RSSI 取得手法

Fig. 5 RSSI collection method between stationary nodes.

究では確率密度関数として 3.1.1 項の式 (2) に示す正規分布の確率密度関数を使用しているため, 確率密度関数を取得するためには, 距離 r に対する $RSSI$ の平均と分散を求めればよい.

位置情報や壁数と違い, 距離 r に対する $RSSI$ の平均と分散を取得するためには実際に距離やノード間の壁の状況を変化させて行う $RSSI$ 測定が必要となる. しかしながら, 無線ホームネットワークの構築時や, 新たな固定ノードの設置のつどいう度式算出のための $RSSI$ 測定を行うことは非現実的である.

そこで, 固定ノードの位置と間取り図などから得られる固定ノード間の壁の状況 (枚数, 厚み) を既知とし, 固定ノード間の $RSSI$ を用いて確率密度関数を導出する手法を提案する. 具体的には, 位置推定時に移動ノードと固定ノード間の $RSSI$ を収集する際, 固定ノード間の $RSSI$ も同時に収集し, これらを用いて確率密度関数を算出する.

以下に, 提案する確率密度関数取得のための固定ノード間 $RSSI$ の取得手法 (図 5) について詳細を示す. なお, 以下の説明においては, 文献 1), 2) で提案されている無線ホームネットワーク向けプロトコルを利用しているものとし, すべての固定ノードにはネットワーク構築時に s_0, s_1, \dots, s_{n-1} と昇順に ID が割り振られているものとする.

1. 移動ノードがブロードキャストしたパケットを各固定ノードが受信し $RSSI$ を得る.
2. GW が固定ノード s_0 に $RSSI$ 要求パケットを送信する.
3. 要求パケットを受信した固定ノードは, 移動ノードからのパケットの $RSSI$ を格納した返答パケットを GW に返信する. このとき, 他の固定ノードは, 返答パケットを受信し, $RSSI$ を得る.

4. 返答パケットを受信した GW は、次に ID の小さい固定ノードに要求パケットを送信する。
5. 要求パケットを受信した固定ノードは、移動ノードからのパケットの *RSSI* に加え、それまでに受信した他の固定ノードからの返答パケットに対する *RSSI* も返答パケットに格納し、GW に送信する。このようにして、GW からの要求パケットをまだ受けていない固定ノードは、他の固定ノードからの返答パケットに対する *RSSI* を得る。
6. 4, 5 を最後の固定ノードからの返信パケットを受信するまで繰り返す。

つまり、 n 番目に要求を受けた固定ノードから GW に送信される返答パケットには、移動ノードからのパケットに対する *RSSI* だけでなく、 $n - 1$ 番目までに要求を受けた固定ノードからのパケットに対する *RSSI* が含まれている。なお、固定ノードが保持している *RSSI* は、GW への返答パケット送信後、破棄する。

前述のとおり本研究では固定ノードの座標と各固定ノード間の壁の状況を既知としているため、以上の処理により取得されたすべての固定ノード間の *RSSI* を用いることで、壁の状況に応じた距離と平均 *RSSI* の関係式を最小二乗法により得ることができる。ここで、一般に最小二乗法を用いるには少なくともデータが 3 点必要である。本方式の場合、位置が既知なノードが少なくとも壁で隔てられないある 1 つの領域に 3 ノードとその領域から壁で隔てられた領域に 1 ノード存在すれば最小二乗法を用いることができる。たとえば、リビング・ダイニングに 3 ノードと、そこから壁で隔てられた部屋に 1 ノード存在すればよいことになる。このようなノード配置状況は一般に起こりうると考えられるため、本研究で対象としている複数の部屋に位置が既知なノードが点在する環境に対して、提案する確率密度関数の自動取得方式は適用可能であるといえる。

以上より、ユーザの負担なしに確率密度関数を得ることができ、位置推定処理の適用が容易となる。

4. 性能評価

提案した透過減衰を考慮した位置推定手法、および平均 *RSSI* 導出式の自動取得手法を NEC エレクトロニクス株式会社の TK-78K0/KF2+ZB を用いて構築した、評価システムを用いて実環境で性能評価を行った。TK-78K0/KF2+ZB の諸元を表 3 に示す。さらに、評価環境の平面図を図 6 に、固定ノードの配置座標を表 4 に、評価条件を表 5 に示す。なお、禁止領域とは家の構造上、移動ノードの配置が困難な場所であり、位置推定の対象領域から除外する領域のことである。

表 3 TK-78K0/KF2+ZB の諸元
Table 3 Main features of TK-78K0/KF2+ZB.

MCU	μ PD78F0547
フラッシュメモリ	128 KB
高速 RAM	1 KB
拡張 RAM	6 KB
動作周波数	16 MHz (サブクロック : 32.768 KHz)
RF トランシーバ	CC2420EM ボード
<i>RSSI</i> 取得範囲 (dBm)	-20 ~ -84
<i>RSSI</i> 取得精度	整数値



図 6 評価環境
Fig. 6 Evaluation environment.

以上の環境下で、ノード間にある壁の枚数による減衰項を含む平均 *RSSI* 導出式を用いることにより透過減衰に対応する場合 (提案法 1) ノード間にある壁の厚みの合計による減衰項を含む平均 *RSSI* 導出式を用いることにより透過減衰に対応する場合 (提案法 2), お

表 4 固定ノード座標

Table 4 Coordinates of stationary nodes.

固定ノード番号	x 座標	y 座標	z 座標
a	0.100	1.116	2.129
b	2.485	0.093	1.040
c	3.817	5.351	1.923
d	6.430	3.996	1.001
e	7.086	4.161	1.227
f	10.359	4.393	1.363
GW	11.389	2.116	1.226

表 5 評価条件

Table 5 Evaluation conditions.

ノード数	8
	(内訳)
	GW 1
	固定ノード 6
	移動ノード 1
領域数	10
最大ノード間壁数	2
平均固定ノード間距離 (m)	5.72
移動ノード高 (m)	1
推定点数	18
1 地点あたりの試行回数	10

表 6 実機評価結果

Table 6 Evaluation results.

移動ノード位置	従来法	方式 1	方式 2
1	1.14	1.33	0.75
2	1.80	1.30	1.42
3	2.68	3.11	3.68
4	2.41	0.86	0.78
5	3.80	3.80	3.92
6	1.89	0.83	0.84
7	0.56	0.53	0.24
8	3.02	1.34	1.26
9	3.11	0.97	1.29
10	0.81	0.59	0.43
11	0.37	0.42	0.42
12	0.57	1.30	1.48
13	1.78	1.07	1.16
14	2.76	1.08	1.53
15	6.49	1.12	2.10
16	4.30	1.87	2.46
17	3.01	2.16	2.40
18	1.78	1.37	1.41
平均推定誤差 (m)	2.35	1.39 (59.1)	1.53 (65.1)
推定誤差分散 (m ²)	2.23	0.72 (32.3)	1.02 (45.7)
部屋間違い	2	0	0

() 内は従来法の結果に対する割合 (%)

よび、壁の状況を考慮しない場合（従来法）の 3 種類の評価実験を行い、推定誤差平均、推定誤差分散、部屋間違い数を比較する。提案手法で用いられる平均 $RSSI$ 導出式（式 (4)、(5)）については、確率密度関数取得のための固定ノード間 $RSSI$ の取得手法で収集した $RSSI$ を用いて 1 回の試行ごとにそれぞれの係数 (a, b, c, d) を算出する。ここで、部屋間違いとは実際の位置から壁を隔てた位置に推定された場合のことをいう。評価結果を表 6 に示す。

表 6 より、従来法と異なり提案法では部屋間違いがなくなっており、従来法に比べ両提案手法は平均誤差が 70%以下になっている。また、推定誤差分散についても低く抑えられている。これらは、ノード間の壁の状況に応じた確率密度関数を使用していることによる効果だと考えられる。

しかしながら、移動ノード位置 3, 5 などのように、提案手法による推定誤差が従来手法

の結果より悪くなっている場合もある。これは、処理の簡単化のために、領域の形状を矩形に限定しているため、実際には電波減衰が生じるノード位置 3, 5 間の禁止領域にある物体の影響が考慮されていないことに起因すると考えられる。こうした物体の影響を考慮するためには、電波伝搬経路を厳密に考慮した領域分割が必要である。具体的には、図 3 の領域 1 において、固定ノード d と直線で結んだときに、交差する壁の枚数が 3 枚となる座標 (3,0) 付近と 1 枚となる座標 (0,0) の付近を分割し、別領域として扱うことになる。このような電波伝搬経路を厳密に考慮した領域分割により推定精度の改善が期待できるが、これについては今後の課題である。

また、提案手法 1 と比較して提案手法 2 は平均誤差が増加している。これらの推定平均誤差の差異に有意な差が存在するかどうかを確認するために、t 検定を行った。その結果、既存手法と各提案手法の間には 5% 水準で有意差あり、提案手法間には 10% 水準でも有意差ありとはいえない、という結果となった。このことから、各提案手法間には差がなく、既

存手法と比較して性能が改善されていることが分かる。また、推定誤差の分布を見てみるとおおむね 1 m 程度になっていることから、マンロケーションサービスなど部屋ごとのユーザの位置に応じたサービス提供に必要な性能を、ノード間に存在する壁による透過減衰を考慮することによって、平均固定ノード間距離 5 m 程度で達成できているといえる。

ここで、本手法では家庭内に存在する壁はすべて同じで、減衰特性も同じものとして扱っているが、実際は壁内部の鉄筋の有無など、材質の異なる壁が存在する。間取り図などから得られる壁の枚数や厚みの情報と異なり、材質などの情報を得ることは難しいが、各壁の減衰特性を考慮することにより、さらなる精度改善が可能であると考えられるため、材質の考慮は今後の課題である。

5. ま と め

本研究では、無線ホームネットワーク環境に位置推定手法を導入するための必要条件を検討し、その必要条件をすべて満たす位置推定手法を提案した。本手法では複数の部屋を対象とした位置推定を行うため、*RSSI* と最ゆう法を利用した位置推定において、推定位置と位置が既知のノード間の障害物環境条件に合わせて利用するゆう度関数を適宜変更する。

また、同時に位置が既知のノード間の *RSSI* を取得し、得られた *RSSI* からその環境に適した確率密度関数を自動導出する。これにより確率密度関数の決定のための事前測定が省略でき、運用上のユーザ負担を軽減できる。

最後にノード間の壁の枚数に応じたゆう度関数を利用して位置推定を行った結果、平均固定ノード間距離 5 m 程度で、マンロケーションサービスなど部屋ごとのユーザの位置に応じたサービス提供に必要な性能を達成できたことが示せた。

今後の課題として、本手法の無線ホームネットワークシステムへの導入、固定ノードによるゆう度関数学習手法の提案、電波伝搬経路を厳密に考慮した領域分割や壁の材質の考慮などによる位置推定手法の精度改善があげられる。

謝辞 本研究は、文部科学省グローバル COE プログラム（研究拠点形成費）の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

1) 伊勢正尚, 小笠原泰弘, 渡邊賢治, 畠中理英, 尾上孝雄, 庭本浩明, 芥子育雄, 白川功: IEEE 802.15.4 を用いたホームネットワーク向け無線ネットワークプロトコル, 信学技報, CAS2005-99, pp.19-24 (2006).

- 2) 渡邊賢治, 伊勢正尚, 藤田 玄, 畠中理英, 尾上孝雄, 庭本浩明, 芥子育雄, 白川功: 無線ホームネットワークにおける消費電力および即時性の改善手法, 信学技報, CAS2005-100, pp.25-30 (2006).
- 3) Society, I.C.: IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 15.4, Wireless Medium Access Control (Mac) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS) (2003).
- 4) <http://www.ambient-networks.org>
- 5) 高島雅弘, 趙 大鵬, 柳原健太郎, 福井 潔, 福永 茂, 原 晋介, 北山研一: センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.5, pp.742-750 (2006).
- 6) 山田 功, 大槻知明: 局所的な減衰定数の違いを考慮した屋内位置推定手法, 第二種研究会資料, sn2006-38, pp.1-5 (2006).
- 7) 岩本和也, 三野理人, 柳原健太郎, 原 晋介, 北山研一: 確率伝播に基づいた繰り返し位置推定手法に関する研究, 第二種研究会資料, sn2006-39, pp.7-13 (2006).
- 8) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. 9th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*, pp.775-784 (2000).
- 9) Wang, C., Chiou, Y. and Yeh, S.: A location algorithm based on radio propagation modeling for indoor wireless local area networks, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol.5, pp.2830-2834 (2005).
- 10) Hatami, A. and Pahlavan, K.: In-building intruder detection for WLAN access, *IEEE PLANS*, pp.592-597 (2004).
- 11) Tsuji, H., Kikuchi, S. and Kaveh, M.: Indoor Localization using Subspace Matching: An Experimental Evaluation, *Proc. IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Sig.*, pp.541-545 (2006).
- 12) 池田昇平, 辻 宏之, 大槻知明: 部分空間マッチングを用いた屋内位置推定における信号部分空間間相関の影響, 信学技報, RCS2007-99, pp.13-17 (2007).
- 13) ITU-R P.1238-1, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz.
- 14) 三瓶政一: デジタルワイヤレス伝送技術, 株式会社ピアソン・エデュケーション (2002).

(平成 20 年 12 月 16 日受付)

(平成 21 年 5 月 13 日採録)



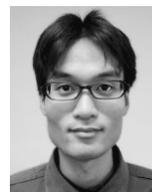
畠中 理英

平成 11 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。平成 12 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 14 年同大学院博士後期課程退学，同大学助手，現在に至る。通信・放送用 VLSI の設計に関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会各会員。



達可 敏充

平成 21 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。コグニティブ無線に関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会各会員。



渡邊 賢治（正会員）

平成 16 年大阪大学工学部電子情報エネルギー学科卒業。平成 18 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。平成 21 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。ホームネットワークに関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会各会員。



尾上 孝雄（正会員）

平成 3 年大阪大学工学部電子工学科卒業。平成 5 年同大学大学院博士前期課程修了。現在，同大学院情報科学研究科教授。低消費電力メディア処理アーキテクチャおよびその SoC 実装に関する研究に従事。工学博士。IEEE，電子情報通信学会，映像情報メディア学会，画像電子学会各会員。