

UHF 帯 RFID を用いたセンサログに基づく物品位置情報推定手法

金子 祥貴[†] 藤原 国久^{††} 富井 尚志^{†††}

[†] 横浜国立大学大学院環境情報学府情報メディア環境学専攻 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{††} 横浜国立大学工学部電子情報工学科 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

^{†††} 横浜国立大学大学院環境情報学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: {kaneko-yoshiki-jg,fujiwara-kunihisa-dj,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 実世界に存在するモノを識別する技術として RFID(Radio Frequency IDentification) が盛んに用いられるようになった. 近年では, 通信距離の長い UHF 帯 RFID が利用可能になり, 近傍に存在する複数のタグを一度にまとめて検知することが可能になった. しかし, これらの技術を用いて, 大量に存在するモノの位置を特定するような手法は未だ確立されていない. 本論文ではタグの反応履歴のデータベースを構築し, 蓄積された複数のセンサログを用いてモノの位置情報を推定する手法を提案する. 本手法では通信距離の長い UHF 帯 RFID で取得されるモノの反応とその時点でのエージェントの位置情報を組み合わせることで, 無意識に日常生活を送るだけで, モノの位置情報を推定することが可能となる. また, リーダの電波強度とタグの種類の組み合わせによって発生するタグの検知率を確率密度関数によってモデル化することで, モノの位置情報を確率として表現することが可能となる. 本手法を用いることで, 座標推定だけでなく, 利用者の目的に応じた多様なモノの位置検索が可能となることを示す.

キーワード 位置推定, 時空間データベース, UHF 帯 RFID, ユビキタスコンピューティング

Object Localization Method using Sensor Logs with UHF Band RFID

Yoshiki KANEKO[†], Kunihisa FUJIWARA^{††}, and Takashi TOMII^{†††}

[†] Department of Information Media and Environment Sciences, Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

^{††} Division of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Yokohama National University

^{†††} Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

E-mail: {kaneko-yoshiki-jg,fujiwara-kunihisa-dj,tommy}@ynu.ac.jp

Abstract RFID(Radio Frequency IDentification) came to be used as a technology to identify the object. In recent years, we able to use an UHF band RFID that enables long distance detection and is able to detect plural tags at the same time. However, object localization method using these techniques is not yet established. In this paper, we build a database of the detection history of UHF band RFID tags and propose the method to estimate object localization using many RFID sensor logs.

Key words Object localization, Spatio-temporal database, UHF Band RFID, Ubiquitous computing

1. はじめに

計算機の高速化, センサ類の普及によりユビキタスコンピューティングの実現がより一層期待されている. ユビキタスコンピューティングの実現には実世界の文脈や状況を認識すること(コンテキストウェアネス)が重要である. その中でも位置認識技術はユビキタスコンピューティングを実現するうえで必須技術の一つであるといえる. 実際に, 観光ガイドや歩行者ナビなど GPS や無線 LAN から取得されるユーザーの位置情報を活用した多くのサービスが利用されており, 今後一層, 位置情報を活用したサービスが普及するものと考えられる. しかし, 人の位置推定が普及する一方で, 大量に存在する物品(以下, 単に「モノ」)の位置を推定するような手法はいまだ確立されていないのが現状である.

そこで本論文では UHF 帯パッシブ RFID(Radio Frequency IDentification) タグをモノに貼付し, エージェントに装着された UHF 帯 RFID リーダによって取得されるモノの反応履歴とその時点でのエージェントの位置情報を組み合わせることでモノの位置推定を行なう手法を提案する. UHF 帯パッシブ RFID タグは一枚一枚が安価であり, バッテリーが不要であるため, さまざまなモノに貼付することが可能である. また, 通信距離が数十 cm~数mと長距離であるため, 近傍に存在する複数のタグを一度にまとめて検知することが可能である. そのため, エージェントは無意識に日常生活を送るだけで, モノの反応履歴を取得することが可能となる. エージェントの位置情報は GPS や無線 LAN, ショートレンジ RFID など環境によって最適な手段で取得すればよく, 人の位置推定技術がそのまま応用できると考えている. また, UHF 帯 RFID タグの検知率はリーダとの角度

や距離など、さまざまな要因によって変化することが考えられる。そこで本提案手法ではタグの検知率を確率密度関数によってモデル化することで、モノの位置を存在確率分布によって表現し、位置推定を行なう。存在確率分布によって位置情報を表現することで、座標推定だけでなく、利用者の目的に応じた多様なモノの位置検索が可能となることを示す。

2. 問題設定

本章では、従来のモノの位置推定方法における問題点と利用者の立場からみた推定結果に対する問題点をあげ、解決すべき課題をより明確にする。

2.1 モノの位置推定における問題点

位置推定を行なう研究は、人やロボットの位置推定を行なう研究とモノの位置推定を行なう研究に大別される[1]。人やロボットの位置推定に関しては数多くの研究がなされており[2]～[9]、その技術も様々なものが提案されている。例えば、座標推定だけでなく、推定に利用されるセンサ値の曖昧性を考慮し、確率的手法によって位置推定を行なう研究[10]や、確率的に得られる位置情報をフィルタリングによって効率的に利用する研究[11]もなされている。現在ではその技術も成熟しつつあり、研究段階から実用段階に移行しつつあるといえる。実際に人の位置情報を利用したさまざまなサービスが運用されている[12]～[14]。本論文においても、モノの位置推定に利用されるエージェントの位置情報はこれらの技術によって取得されることを想定する。

人やロボットの位置推定を行なう研究と比較して、モノの位置推定を行なう手法は確立されていないのが現状である。人やロボットの位置推定に利用されるセンサデバイス（無線 LAN, ZigBee など）をモノに付与することで、モノの位置推定を行なうことは原理上可能である[15]が、モノの数は人と比べて大量に存在するため、モノ一つ一つにそのようなセンサデバイスを付与することは非常にコストのかかるものになってしまう。また、そのようなセンサデバイスのほとんどがバッテリーによって駆動するものであるため、バッテリー管理などの面倒な作業が発生してしまうという問題もある。他にもセンサデバイスをモノに付与する代わりに、センサデバイスを環境に埋め込むことでモノの位置推定を行なうという方法が考えられる[16]。代表例として、カメラによる画像処理があげられる。これらの研究はあらかじめ登録されたモノの特徴量からモノを特定し、三辺測量などを応用することで、高い精度で位置推定を行なうことを可能としている。しかし、これらの研究の多くはセンサデバイスが環境に固定されているため、限定された環境のみでしか位置推定を行えないといった欠点がある。また、同じ形状をしたモノを区別することができないといった問題もあげられる。以上のことを考慮すると大量のモノの位置推定を行なう為には、以下の条件を満たしていることが望ましいといえる。

- 1 モノ自身に高価なセンサデバイスを必要としない
- 2 モノ自身にバッテリーを必要としない
- 3 同じ形状をしたモノを一意に識別することができる
- 4 環境に依存しない

以上の問題点を解決するため、本論文ではモノに貼り付けられた UHF 帯 RFID の反応履歴とその時点でのエージェントの位置情報の組み合わせによって、モノの位置推定を可能にする位置推定手法を提案する（4 章にて詳述）。RFID タグは安価であり、かつバッテリーを必要としない。またタグ一つ一つに一意の ID が割り当てられているため、モノを一意に識別することが可能である。これらの理由から、1～3 の問題を解決することが可能である。また、4 の問題に対して本提案手法はカメラのような固定配置されたセンサデバイスを必要としない。そのため、エージェントの位置情報を獲得できる環境化にあれば、モノの位置推定が可能である。

2.2 位置推定結果に対する問題点

従来の位置推定における研究のほとんどが位置座標を推定す

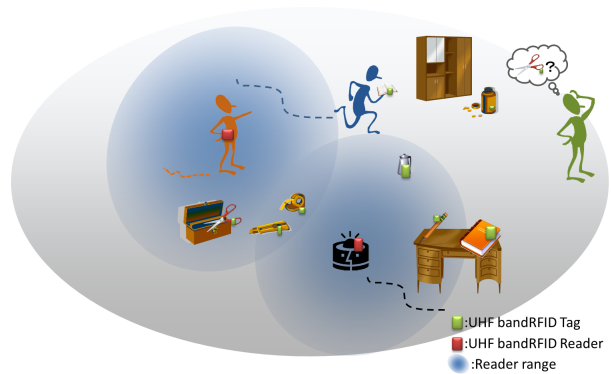


図 1 想定環境

ることに焦点が当てられている[17],[18]。しかし、利用者の立場からすると単純にモノの位置座標を推定してくれるだけでは不十分であることが考えられる。例えば、推定された位置座標が大きな誤差を含んでいた場合、推定結果は利用者にとって全く価値のないものになってしまう。さらに、利用者が実際に知りたいことは位置座標ではなく、どの領域にモノが存在するのかといった要求である場合が多い。例えば、「本 A は本棚 B にあるのか、それとも机 C においてあるのか知りたい。」や「本 A の在庫はどの本棚にどれくらいあるのか知りたい。」といった要求である。これらの要求に対して、位置座標のみの推定では、推定結果が対象となる領域から少しでも外れてしまった場合、その領域には存在しないものとして間違った判断をしてしまう。対象となる領域にモノが存在するか判断するためには、センサから得られる情報の不確かさを考慮し、推定結果がどの程度誤差を含むのかを考える必要がある。本提案手法ではモノの位置情報を存在確率分布によって表現することで、推定された結果の曖昧性を確率によって表現することを可能とする。

3. 提案手法

本章では、タグの反応履歴とエージェントの位置情報を組み合わせたモノの位置推定手法について述べる。

3.1 想定環境

図 1 に想定する環境のイメージ図を示す。エージェントは人や移動ロボットなど日常的に移動を行なう移動体を想定しており、その位置情報は無線 LAN やショートレンジ RFID などの既存技術によって取得され、既知であることとする。また、エージェントには UHF 帯 RFID リーダが装着されており、このリーダによってモノの反応履歴が取得される。固定配置されたセンサと違い、エージェントは移動するため、さまざまなモノの反応履歴を取得することが可能である。近年、RFID リーダはスマートフォンなどのモバイルデバイスに搭載されつつあり、今後より一層普及していくことが見込まれる。

位置推定の対象となるモノは自律的な移動は行わず、他者の介入によってのみ、まれに移動が発生するものを対象とする。実際、実世界に存在するモノのほとんどが自律的な移動は行わないため、妥当な想定であるといえる。例えば、オフィス環境において共有物品を管理することを想定した場合、モノが目まぐるしく移動していることはほとんどなく、ある人が利用するときのみ移動が発生する程度である。モノには UHF 帯 RFID タグが貼付されており、このタグの反応履歴（以降、「タグの反応」＝「モノの反応」とする）を通して位置推定が行われることになる。タグ自体は安価であり、次世代のバーコードとして注目されていることから、今後、モノ一つ一つにタグが貼付されることがより普及すると考えられる。

3.2 位置推定手法

UHF 帯 RFID は HF 帯 RFID と比較して長距離での通信ができるため、一度に近傍に存在するタグを検知することが可

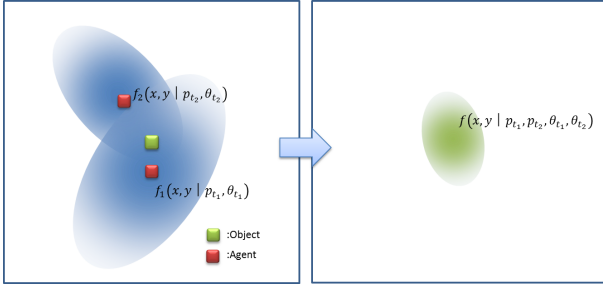


図 2 アンカーノードの掛け合わせ

能である。しかし、長距離での通信が可能であるがゆえに、どこで検知されたのか定まらず取得されるログの粒度が荒くなってしまうという問題がある。そこで、本提案手法では UHF 帯 RFID によって取得されるログの曖昧性を確率密度関数 $f(x, y)$ によって表現することで、モノの位置を確率的に推定する手法を提案する。この確率密度関数は予備実験などにより定義されるものであり、環境によって自由に設定できるものである。本実験では 2 変量正規分布を用いているが、リーダの特性やタグの種類などは環境によって異なるため、それぞれに適した確率密度関数を定義する必要がある。

本提案手法におけるモノの位置推定はモノの反応時点でのアンカーノードを組み合わせてることによって推定される。以下にアンカーノードの定義を示す。

定義 アンカーノード：時刻 t_i において、 p_{t_i} に位置するエージェント（リーダ）が向き θ で、タグを検知したときに定まる確率密度関数 $f_i(x, y | p_{t_i}, \theta_{t_i})$

エージェントの位置情報は既知であるため、取得されるアンカーノードは、その地点でモノが検知されやすいことを示している。つまり、モノの反応があったとき、アンカーノードはその時点でのモノの存在確率分布を表すといえる。図 2 に提案手法のイメージ図を示す。モノ一つ一つの反応は独立であるため、モノに対する反応が複数ある場合、最終的なモノの存在確率分布は各モノの反応時点から見たモノの存在確率分布（アンカーノード）の掛け合わせによって以下のように求めることができる。

$$f(x, y | p_{t_1}, \dots, p_{t_n}, \theta_{t_1}, \dots, \theta_{t_n}) = \frac{\prod_{i=1}^n f_i(x, y | p_{t_i}, \theta_{t_i})}{\iint \prod_{i=1}^n f_i(x, y | p_{t_i}, \theta_{t_i}) dx dy} \quad (1)$$

存在確率分布の掛け合わせによって、確率は収束していくため、取得されるアンカーノードが多ければ多いほど精度の良い位置推定が期待できる。求められた存在確率分布から位置座標を決定するには、存在確率分布において、最大値を示す座標を選択すればよい。また、ある領域 S に存在する確率を求めるには、指定された領域 S において存在確率分布 $f(x, y)$ を積分することで確率 $prob(S)$ を求めることができる。

$$prob(S) = \iint_{x, y \in S} f(x, y) dx dy \quad (2)$$

3.3 移動検出

前節では、モノの反応時点におけるアンカーノードを利用したモノの位置推定手法を提案した。しかしながら、推定対象であるモノはまれに移動することが考えられる。そのため、そのままアンカーノードを利用してしまうと、誤った推定結果を求めてしまう可能性がある。精度のよい推定結果を得るためには、モノの移動を検出することでアンカーノードをクラスタリングする必要がある。図 3 にモノが移動した際に行われるクラスタリングを示す。 p_{t_i} は時刻 t_i におけるモノ反応時のエージェントの位置である。図 3 は $t_1 \leq t \leq t_4$ の範囲において、モノは静止状態にあり、 $t_4 \leq t \leq t_5$ 間で移動、 $t_5 \leq t \leq t_8$ 間では再び静止状態にあることを示している。

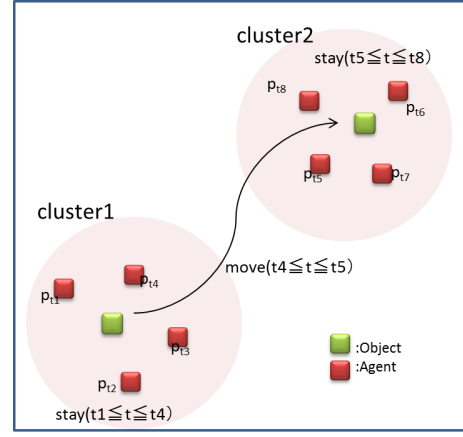


図 3 タグの反応履歴のクラスタリング

移動判定はモノの反応系列を考慮した単純な閾値処理によって行なう。リーダの検知範囲には限りがあるため、モノが静止状態のとき、モノの反応時におけるエージェントの位置は、モノを中心とした付近に集合する可能性が高い。そこで、モノの反応時におけるエージェントの位置がそれ以前のモノの反応時におけるエージェントの位置の平均値 p_{ave} から閾値 τ 以上離れたとき、モノは移動したと判断する（式（4））。 $dist(A, B)$ は、A と B の距離を表す。

$$p_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{t_i} \quad (3)$$

$$dist(p_{t_i}, p_{ave_{i-1}}) > \tau \quad (4)$$

閾値は自由に設定することが可能であり、モノの位置推定を行なう環境やセンサによって閾値は最適な値を設定する必要があるといえる。以上よりアンカーノードをそれぞれのクラスタ $j (j = 1, 2, \dots, m)$ にクラスタリングすることで、位置推定式は以下の式（5）のように表される。

$$f^j(x, y | p_{t_1}, \dots, p_{t_n}, \theta_{t_1}, \dots, \theta_{t_n}) = \frac{\prod_{i=1}^n f_i^j(x, y | p_{t_i}^j, \theta_{t_i}^j)}{\iint \prod_{i=1}^n f_i^j(x, y | p_{t_i}^j, \theta_{t_i}^j) dx dy} \quad (5)$$

それぞれのクラスタに対して、位置推定を行なうことでより正確な位置推定が期待できる。

3.4 推定結果の蓄積方法

図 4 に推定される位置推定結果のイメージ図を示す。データベースからモノの位置情報を問い合わせるときに、求められた存在確率分布をそのままデータベースで扱うことは難しい。そこで、空間をメッシュ状に分割することによって、それぞれのメッシュにおいて確率を計算しデータベースに蓄積する。領域 S における確率を問い合わせる場合は領域 S に関わるメッシュの確率を足し合わせることで表現することができ、高速な検索が期待できる。図 4 において、モノは緑線上では静止状態にあり、赤線上では移動状態にあることを示している。前述した移動判定によって、 $t_1 \sim t_5$ までのモノの反応時におけるアンカーノード $f_i(x, y | p_{t_i}, \theta_{t_i})$ は、 $\{f_1(x, y | p_{t_1}, \theta_{t_1}), f_2(x, y | p_{t_2}, \theta_{t_2}), f_3(x, y | p_{t_3}, \theta_{t_3})\}$ と $\{f_4(x, y | p_{t_4}, \theta_{t_4}), f_5(x, y | p_{t_5}, \theta_{t_5})\}$ の二つにクラスタリングされる。位置推定はそれぞれのクラスタリングにおいて行われるため、それぞれのメッシュにおける確率はクラスタごとに図 4 のようにデータベースに蓄積される。

4. 予備実験：距離に対するタグの検知率の測定

本章では、実環境実験を行なうに先立ち、本実験に利用する UHF 帯 RFID リーダがモノを検知した際に取得されるアンカーノードがどのような確率密度関数によって表されるかを予

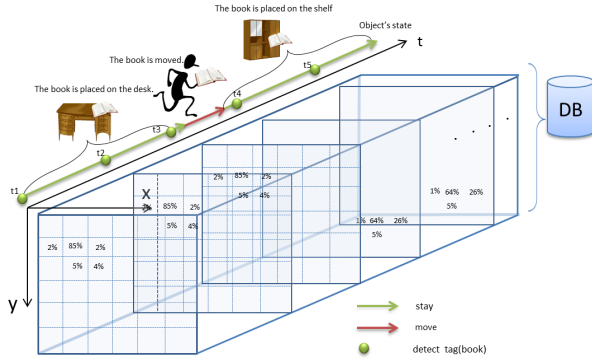


図 4 モノの状態とデータベースに蓄積される推定結果

備実験によって検証する。一般に、パッシブ RFID は電磁波源である RFID リーダから距離が遠くなるにつれて RFID タグのアンテナの実効面積で受信できる電力は減少していき、RFID タグの動作電力以下になると検知不能となる。このことから、距離が遠くなるにつれて RFID タグの検知率は減少していくことが予想される。そこで、予備実験として、距離に対するタグの検知率の測定を行なった。

4.1 実験方法

実験は二種類 (大型, 小型) の UHF 帯パッシブ RFID タグと RFID リーダ (電波強度: 弱, 強) の 4 つの組み合わせで行なった。それぞれの距離に対して 380 回リード処理を実行し、そのうち何回リードできたかを検知率として測定した。図 5 に実験に使用したリーダとタグを、図 6 に測定時の様子を示す。UHF 帯 RFID は一般に指向性が強いことから測定はリーダに対して正面方向と直角方向の二方向において行なった。測定を行なう際に、実際の環境ではタグはリーダに対してランダムな角度で検知されることが予想されるため、それぞれのタグについて、角度 θ は $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲で 10° 刻みで 20 回ずつ (計 380 回) リード処理を実行した。実験に使用したリーダとタグは以下の通りである。

- 大型タグ: UPM 社製 SC3001601-UHF-R100
- 小型タグ: UPM 社製 SC3001275-UHF-R100
- UHF 帯 RFID リーダ: Welcat 社製 XIT-160-BR-C (リーダが発する電波強度を 2 段階 (強, 弱) に変更可能)

4.2 実験結果

実験結果を図 7 に示す。青い棒グラフが実際に測定されたタグの検知率である。どの結果も、タグの検知率は距離に伴い、減少していく傾向にあることが示されている。つまり、リーダの検知範囲にタグが存在したとしても、検知が必ず発生するとは単純に言えないことがわかる。

4.3 2 変量正規分布による近似

測定結果から、距離に対するタグの検知率は、正規分布によって近似することが可能であると考えられる。図の赤で示した曲線が近似によって求められた正規分布である。予備実験より、本実験におけるタグの検知率はタグの種類とリーダの電波強度によって定まる、2 変量正規分布 $f(X|p, \theta)$ (式 (6)) によって表されるものとする。 p はタグ反応時のリーダ (エージェント) の位置 (x, y) であり、共分散行列 Σ は近似によって求められた正面方向と直角方向の分散値によって定まる行列である。表 1 に予備実験によって求められたそれぞれの標準偏差を示す。 σ_{front} は正面方向の標準偏差、 σ_{side} は直角方向の標準偏差である。以下、本シミュレーション実験、実環境実験におけるパラメータは表 1 を参照するものとする。図 8 にタグの検知率のイメージ図を示す。

$$f(X|p, \theta) = \frac{1}{2\pi|\Sigma|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X-p)^t \Sigma^{-1}(X-p)\right] \quad (6)$$

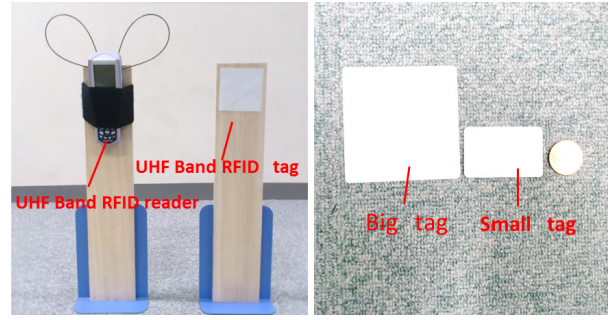


図 5 実験に利用したリーダとタグ

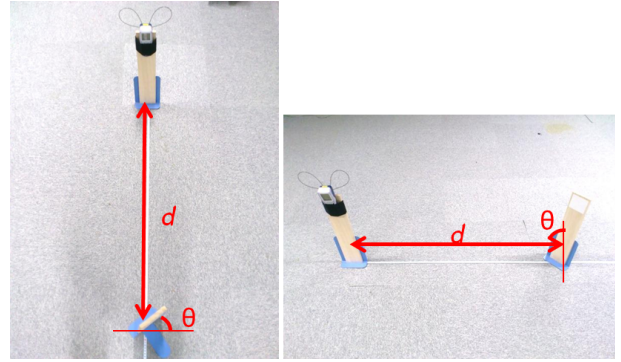


図 6 距離に対するタグの検知率測定実験 (左:正面方向, 右:直角方向)

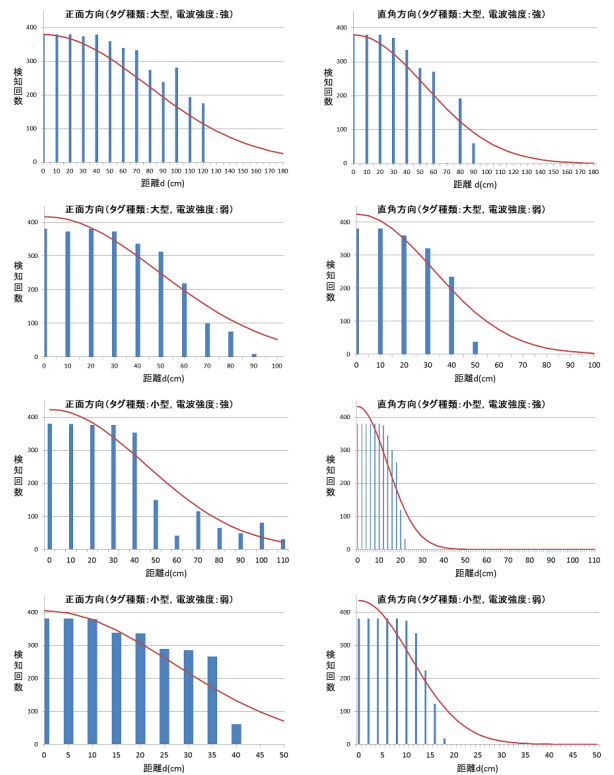


図 7 距離に対するタグの検知率

5. シミュレーション実験

本提案手法の有用性を示すために、移動検出、位置推定のシミュレーション実験を行なった。以下にそれぞれの実験における実験結果と考察を述べる。

5.1 シミュレーション環境

シミュレーション環境は実際の環境を想定し、以下のように

表 1 タグの種類と電波強度によって定まる標準偏差

タグ種類	リーダの電波強度	$\sigma_{front}(\text{cm})$	$\sigma_{side}(\text{cm})$
大型	強	77.6	53.5
大型	弱	49.0	32.2
小型	強	45.2	13.7
小型	弱	26.7	10.9

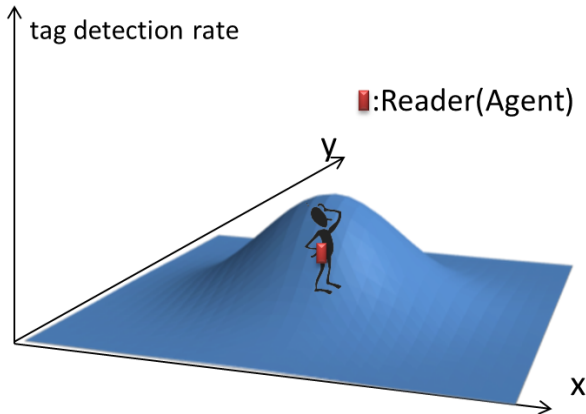


図 8 タグの検知率のイメージ

設定した。

- ・ 広さ: $100\text{m}^2(10\text{m} \times 10\text{m})$
- ・ メッシュ単位: $0.25\text{m}^2(0.5\text{m} \times 0.5\text{m})$

5.2 移動検出実験

3.3 節で述べた提案手法を用いて、移動検出の精度評価を行った。

実験方法

シミュレーション空間において、仮想的なモノを配置し、100回空間内を移動させた。モノの移動タイミングはそれぞれの位置においてアンカーノードが5~20個(ランダムに設定)取得された時点で移動させた。つまり、取得されたそれぞれのアンカーノードから、どの時点でモノが移動したのかを判定し精度の評価を行なう。パラメータ設定は以下の通りである。

各パラメータ設定

- ・ モノの移動回数: 100回
- ・ モノの移動距離: 100m^2 内でランダムに移動
- ・ モノの各位置におけるアンカーノード (AN) 数: 5~20
- ・ タグ種類: 大型タグ
- ・ リーダ電波強度: 強, 弱 (交互に出力を切り替え)
- ・ p_{ave_n} を算出するためのアンカーノードの最大数: 20
- ・ 閾値 $\tau = 2\sigma_{front}$

(電波強度が弱の時: $\sigma_{front} = 49.0\text{cm}$, 強の時: $\sigma_{front} = 77.6\text{cm}$)

実験結果

表 2 に実験結果を示す。実際に移動したモノに対して、移動したと判定した精度が 93 %, 移動していないモノに対して移動していないと判定した精度が 99 % と高精度で移動検出に成功していることがわかる。高精度な移動検出によって正しいクラスタリングが行われるため、精度の良い位置推定が期待できるといえる。

表 2 移動検出結果

	移動した	移動していない
移動したと判定	93 TruePositive	6 FalsePositive
移動していないと判定	7 FalseNegative	1060 TrueNegative

5.3 座標推定実験

提案手法において、推定される位置座標の精度評価を行なった。推定対象となるモノ 100 個に対して、それぞれのアンカーノードの数における、正解座標との平均誤差を算出した。

実験方法

シミュレーション空間内にランダムに 100 個のモノを配置し、それぞれのモノに対して、座標推定を行なう。各モノに対して取得されるアンカーノードは可変とした。各パラメータは以下の通りである。

各パラメータ設定

- ・ 推定されるモノの数: 100 個
- ・ 各位置におけるアンカーノード (AN) 数: 可変
- ・ タグ種類: 大型タグ
- ・ リーダ電波強度: 強, 弱 (交互に出力を切り替え)

実験結果

図 9 に推定を行なった 100 個のモノの平均誤差を示す。ここでの平均誤差とは、推定された存在確率分布の最大値を示す座標と正解座標との距離を表す。図の示すように、アンカーノードの数が少ない場合では、平均誤差は大きく、アンカーノードの数が增多につれて、平均誤差は約 40 cm 前後 ($< 2\sigma_{front}$) で安定していくことがわかる。このことから、推定に利用されるアンカーノードを 20 以上の場合、精度のよい位置座標を求めることができるといえる。

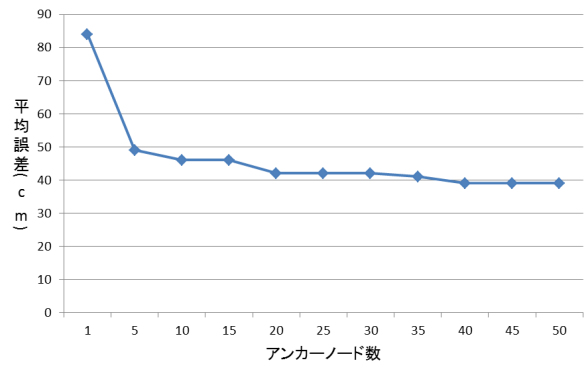


図 9 座標推定における誤差

5.4 場所に対する位置推定実験

本提案手法は座標推定だけでなく、「ある領域にモノが存在するか否か」といった利用者の多様な要求を満たすことが可能である。そこで、「テーブルに存在する確率が x % 以上の物品を取得せよ」という検索クエリを発行した場合を想定し、それぞれの閾値 x % において、再現率、適合率を求め、精度評価を行なった。

実験方法

シミュレーション空間内において、ランダムに 300 個のモノを配置する。そのうち、30 個のモノは仮想的に設定されたテーブル上にランダムに配置する。それぞれのモノに対してテーブル上に存在する確率を計算し、モノがテーブル上に存在するか否かを閾値によって判定する。それぞれの閾値に対して、適合率、再現率を求め、精度評価を行なった。また、求められた確率を足し合わせることでアンカーノードの数が 20 のときの、テーブル上に存在するモノの数の期待値を算出し、実際に存在するテーブル上に存在するモノの数との比較を行なった。各パラメータは以下の通りである。

各パラメータ設定

- ・ 空間全体に存在するモノの数: 300(ランダムに設置)
- ・ テーブル上に存在するモノの数: 30(ランダムに設置)
- ・ テーブルの定義域: $2\text{m}^2(1\text{m} \times 2\text{m})$
- ・ 各モノに対するアンカーノード (AN) 数: 可変

以下に適合率、再現率の定義を示す。

$$\text{適合率} = \frac{\text{テーブル上に存在すると判定し、実際に存在するモノの数}}{\text{テーブル上に存在すると判定したモノの数}} \quad (7)$$

$$\text{再現率} = \frac{\text{テーブル上に存在すると判定し、実際に存在するモノの数}}{\text{テーブル上に存在するモノの数}} \quad (8)$$

実験結果

実験結果を図 10, 図 11 に示す。これらの図より、全体の傾向として推定に利用されるアンカーノードの数が多いほど、高い適合率、再現率を達成していることがわかる。適合率は閾値 40 % 以上においては 0.8 以上を達成しており、高い適合率を維持できているといえる。再現率は閾値を増加させていっても高い値を維持できている。閾値 70 % においても、アンカーノードの数が 10 以上の場合、0.8 前後を達成できている。これらの結果から、アンカーノードの数が多い場合、高い適合率を維持しつつ、高い再現率を達成することができるため、利用者の要求に対して精度の高い推測結果を返すことが可能であるといえる。また、アンカーノードが 20 の時のテーブル上に存在するモノの数の期待値は 28.8 個という結果となり、正解である 30 個に対して高精度でテーブル上に存在するモノの個数を推測できることがわかった。

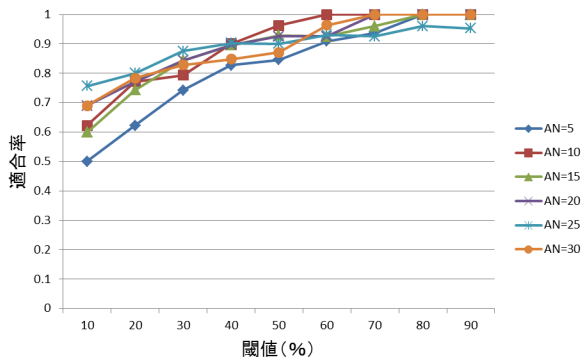


図 10 場所に対する位置推定の適合率

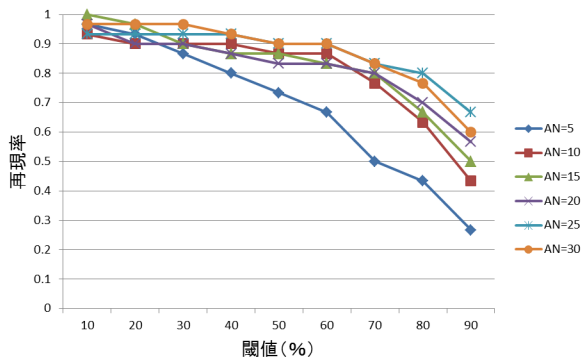


図 11 場所に対する位置推定の再現率

6. 実環境実験

実環境において本提案手法が有用であることを示すため、シミュレーションと同様の実験を実環境において行なった。実験環境と使用したセンサを以下に示す。モノの反応時点におけるエージェントの位置情報は、ショートレンジ RFID を用いて取得した。具体的には、データベースに位置情報が登録されている床に敷き詰められた HF 帯 RFID タグの反応から取得した。なおモノの反応時において、床に敷き詰められた HF 帯 RFID から反応が得られなかった場合、前後の位置情報から線形補完によって位置情報を取得した。ただし、前後の位置情報の取得時間が 1 秒以上離れていた場合、エージェントの位置情報の誤差が大きくなると考えられるため、欠落データとして、位置推定には利用しなかった。

実験環境と使用センサ

- 広さ: $164m^2$
- HF 帯 RFID タグ: OMRON 社製 V730S-D13P01 (7,606 枚 (床に 12.5cm 間隔で格子状に設置))
- HF 帯 RFID リーダ: Welcat 社製 WIT-150-T
- UHF 帯 RFID リーダ: Welcat 社製 XIT-160-BR-C
- UHF 帯 RFID 大型タグ: UPM 社製 SC3001601-UHF-R100 (位置推定対象物品に貼付)
- UHF 帯 RFID 小型タグ: UPM 社製 SC3001275-UHF-R100 (位置推定対象物品に貼付)

図 12 は実際に位置推定のためのアンカーノードの取得を行なったエージェントである。図 13 に実験環境の様子を示す。

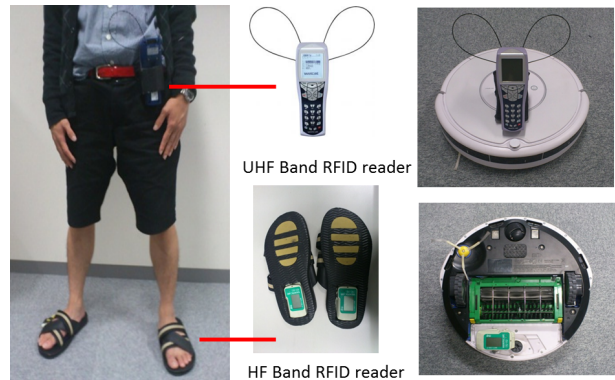


図 12 実験エージェント (左:人, 右:移動ロボット)



図 13 実験環境 (左:座標推定実験, 右:場所に対する位置推定実験)

6.1 座標推定実験

日常的によく使用されるモノ 20 個それぞれにタグを貼付し、座標推定の精度評価を行なった。図 14 に物品に貼付したタグの様子を示す。

実験方法

人と移動ロボット (iRobot 社製 Roomba 530) をエージェントとしアンカーノードの取得を行ない、取得されたアンカーノードをもとに各モノの座標推定を行なった。アンカーノード



図 14 推定物品リスト

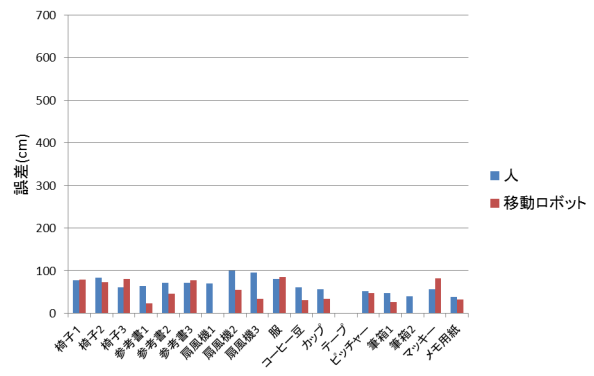


図 16 移動後の各モノにおける座標推定の誤差 (移動検出あり)

の取得は、人の場合、被験者 5 名に実験環境を自由に 5 分間歩行してもらい取得した。移動ロボットの場合は、20 分間×5 回、実験空間内をランダムに移動させ、アンカーノードの取得を行なった。アンカーノードの取得後、各モノをランダムに移動させ、再度同様にアンカーノードの取得を行ない、座標推定を行なった。各パラメータは以下の通りである。

各パラメータ設定

- 推定されるモノの数：20 個
- 実験エージェント：人，移動ロボット
- タグ種類：大型，小型
- リーダ電波強度：強，弱 (出力を 0.5s 毎に切り替え)

実験結果

図 15 に移動検出を考慮しなかった場合の座標推定結果、図 16 に移動検出を考慮した場合の座標推定結果を示す。図が示すように、移動検出を行なうことによって、大幅に誤差を少なくすることに成功していることがわかる。この結果からも移動検出によって、正確なクラスタリングが行われていることがわかる。また、移動検出を行なった場合における推定誤差は人、移動ロボット共に平均約 70 cm 程度となり、シミュレーションと比較すると、低い精度となっていた。実験環境においては、シミュレーションと違い、電波の反射、干渉など様々な要因でリーダの検知率が変化してしまうことが原因であると考えられる。これらの要因を考慮することで、さらに精度向上が見込めると考える。財布 1，財布 2 においては人，移動ロボットともにアンカーノードを取得できなかったため、座標推定を行なえないという結果になってしまった。これは財布の中にある金属によって、検知が不可能になってしまったためであると考えられる。また、移動ロボットにおいては扇風機 1，筆箱 2，テープに対してもアンカーノードを取得できなかった。これは移動ロボットの移動範囲には限界があるため、単純に検知範囲にモノが存在しなかったことが原因であると考えられる。

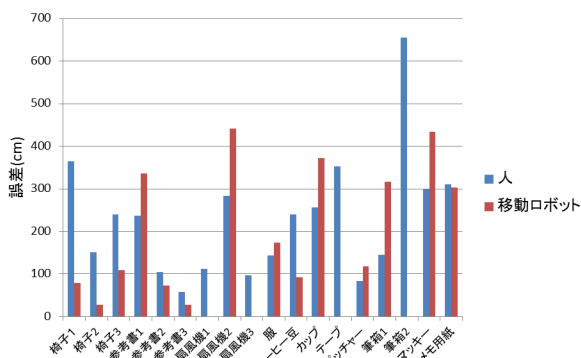


図 15 移動後の各モノにおける座標推定の誤差 (移動検出なし)

6.2 場所に対する位置推定実験

「各テーブルに存在する確率が $x\%$ 以上の本を取得せよ」という検索クエリを発行した場合を想定し、それぞれの閾値 $x\%$ において、再現率、適合率を求め、精度評価を行なった。

実験方法

図 13 に示す実験環境において、エージェント (被験者×4 名) にはそれぞれのテーブルに配置された 70 冊の本の陳列、整理を 5 分間行なってもらい、その際にアンカーノードの取得を行なった。取得されたアンカーノードを利用し、それぞれのモノに対して存在確率分布を算出し、モノがそれぞれのテーブル上に存在するか否かを閾値によって判定する。評価方法は 5.4 節と同様である。各パラメータは以下に示す。

- TableA 上に存在する本の数：30 冊
- TableB 上に存在する本の数：15 冊
- TableC 上に存在する本の数：15 冊
- TableD 上に存在する本の数：10 冊
- タグ種類：大型
- リーダ電波強度：強，弱 (出力を 0.5s 毎に切り替え)

実験結果

図 17，表 3 に実験結果を示す。まず、適合率再現率において、適合率はすべてのテーブルにおいて、ほぼ 1 であった。このことから、他の候補となる領域に存在するモノを、推定対象となる領域に存在すると判定することはほとんどなかったといえる。ただし、領域同士が隣接している場合や、重なりを持つ場合は、適合率は下がることが予想される。再現率については、テーブル A は高い再現率を達成することができた。これは、ほかのテーブルと比べ、テーブル A 上の本に対して取得されたアンカーノードの数が多かったため、高い精度で位置推定が行われたためであると考えられる。テーブル B，テーブル D については、閾値を上げていくと、急激に再現率が下がってしまっていることがわかる。これはテーブル B，テーブル D の領域を壁際に設定したため、取得されたアンカーノードの位置に偏りが出てしまったためであると考えられる。壁際に存在するモノに対しては、リーダに検知されたという事実だけをアンカーノードとして扱うのではなく、リーダが検知できなかったという事実もアンカーノードとして利用することで精度の高い位置推定が可能であると考えられる。テーブル C については各本に対して、取得されたアンカーノードが少なかつたため、確率が収束しなかったことが原因であると考えられる。期待値については、テーブル B，テーブル C，テーブル D に関しては正確な期待値を算出するまでには至らなかったが、高い精度で位置推定が行えたテーブル A に関しては、ほぼ正解に近い期待値を算出することができた。このことから、大量のアンカーノードを取得することで、確率は収束していくため、高い精度で位置推定が行なえ、さらに高い精度で期待値を算出することが可能であることがわかる。

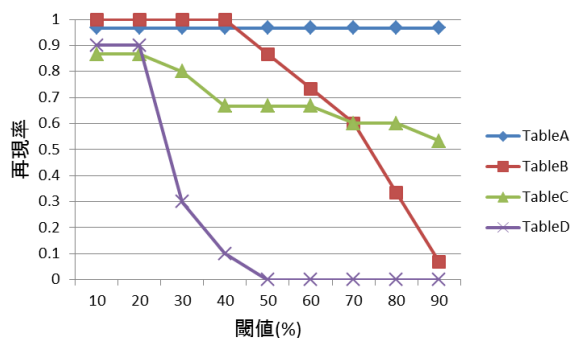


図 17 それぞれのテーブルに対する位置推定の再現率

表 3 テーブル上に存在する本の数の期待値

	期待値	実際に存在する本の数
TableA	29.2 冊	30 冊
TableB	10.6 冊	15 冊
TableC	10.4 冊	15 冊
TableD	2.8 冊	10 冊

7. まとめと今後の課題

本論文では、モノの反応履歴とその時点でのエージェントの位置情報を利用した、モノの位置推定手法を提案した。距離に基づくタグの検知率を確率密度関数によって表現することで、モノの位置情報を確率によって推定することを可能とした。提案手法の有用性を示すために、シミュレーションでの評価実験と実環境下での評価実験を行なった。シミュレーションにおいては高い精度でモノの位置推定を行なえることを示した。実環境においては、すべての条件を満たす位置推定が行えるといえるまでには至らなかった。しかしながら、実環境においても本提案手法における位置推定の実現性を示したといえる。今後の課題として、以下の2つを考慮する必要があると考えている。

(1) エージェント自身の位置情報の誤差の考慮

本提案手法は、推定に利用されるエージェントの位置は既知であり、その情報は正しいという前提のもとでモノの位置推定が行われる。しかし、実際にはエージェントの位置は誤差を含んでいる場合が多い。誤差が小さければ、提案手法は評価実験で示した通り、精度の高い推定を期待できる。しかし、誤差が大きかった場合、著しく精度を落としてしまう可能性がある。今後は、エージェントの位置にどの程度の誤差を含む可能性があるのか、考慮する必要がある。

(2) 検知範囲の細かい検証

本提案手法では、予備実験からタグの検知率を単純な2変量正規分布によって近似処理を行なった。しかし、タグの検知率は環境や貼付された素材、反射波など様々な要因によって変化するため正確に2変量正規分布によって近似できるとは言い難い。単純な近似処理においても、多数のアンカーノードの掛け合わせによって、精度の高い結果を期待できるが、更に高い推定結果を得るためには、学習的アプローチなど、環境ごとに確率密度関数を変化させるなど、さまざまな要因を考慮する必要があると考える。

謝辞 本研究の一部は横浜国立大学大学院環境情報研究院基軸プロジェクト「信頼と納得の情報学」の支援を受けて行なった。また、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(情報爆発IT基盤;課題番号21013023)による。

文 献

- [1] 別所 正博, 小林 真輔, 越塚 登, 坂村 健, “ ユビキタスコンピューティングと屋内環境の位置認識 ”, 電子情報通信学会誌, Vol.92, No.4, pp.249-255, 2009.4.
- [2] 暦本 純一, 塩野崎 敦, 末吉 隆彦, 味八木 崇, “ PlaceEngine:

実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤 ”, インタ-ネットコンファレンス 2006, pp.95-104, 2006.

- [3] 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫, “ locky.jp:無線 LAN を用いた位置情報・測位ポータル ”, 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, Vol.2005, No.90, pp.25-31, 2005.9.
- [4] 小室 信喜, 六田 智之, 待井 一樹, 白石 剛大, 上田 裕巳, 河西 宏之, 坪井 利憲, “ UHF 帯 RFID を用いる屋内位置推定の推定精度向上法 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, pp.41-46, 2009.6.
- [5] 椎尾一郎, “ RFID を利用したユーザ位置検出システム ”, 情報処理学会研究会報告, pp.45-50 2000.5.
- [6] Naohiko Kohtake, Shusuke Morimoto, Satoshi Kogure, and Dinesh Manandhar, “ Indoor and Outdoor Seamless Positioning using Indoor Messaging System and GPS ”, 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2011.9.
- [7] Anthony LaMarca, Yatin Chawathe, Sunny Consolvo, Jeffrey Hightower, Ian Smith, James Scott, Timothy Sohn, James Howard, Jeff Hughes, Fred Potter, Jason Tabert, Pauline Powledge, Gaetano Borriello and Bill Schilit, “ Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild. ” In Proc. 3rd Int'l Conf on Pervasive Computing (PERVASIVE 2005), pp.116-133, 2005
- [8] H. Zhou and S. Sakane, “ Localizing objects during robot SLAM in semi-dynamic environments ” In Proc of the 2008 IEEE/ASME Int'l Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 595-601 2008.
- [9] R. Tesoriero, R. Tebar, J.A Gallud, M.D. Lozano, V.M.R. Penichet, “ Improving location awareness in indoor spaces using RFID technology ” Expert System Applications, pp.894-898, 2010
- [10] 春本 要, 藤原 謙太郎, 寺西 裕一, 秋山 豊和, 竹内 享, 西尾 章治郎, “ 存在確率分布の伝播を用いた自己位置推定手法 ”, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.5, pp.1862 - 1870, 2011.5.
- [11] Yoshiharu Ishikawa, Yuichi Iijima, Jeffrey Xu Yu, “ Spatial Range Querying for Gaussian-Based Imprecise Query Objects ”, Proc. Int'l Conf. on Data Engineering (ICDE2009), pp.676-687, 2009
- [12] 坂村 健, “ Ubiquitous ID Technologies 2011 ”, www.t-engine.org/ja/wp-content/themes/wp.vicuna/pdf/ja/UID910-W001-110324.pdf
- [13] 神田 崇行, 塩見 昌裕, 野村 竜也, 石黒 浩, 萩田 紀博, “ RFID タグを用いた科学館来館者の移動軌跡の分析 ”, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.5, pp.1727-1742, 2008.5.
- [14] Julie Letchner, Christopher R'e, Magdalena Balazinska, Matthai Philipose, “ Access Methods for Markovian Streams ”, Proc. Int'l Conf. on Data Engineering (ICDE2009), pp.246-257, 2009.
- [15] Ming Li, Taketoshi Mori, Hiroshi Noguchi, Masamichi Shimosaka, and Tomomasa Sato, “ Object location estimation with ZigBee module in actual living environment ”. In 1st International Workshop on Human Behavior Sensing (HBS2010), pp. 8-15, Kassel, Germany, 2010.6.
- [16] Prachya Kamol, Stefanos Nikolaidis, Ryuichi Ueda, Tamio Arai “ RFID Based Object Localization System Using Ceiling Cameras with Particle Filter ”, FGCN, pp.37-42, 2007.
- [17] Dirk Hahnel, Wolfram Burgard, Dieter Fox, Ken Fishkin, Matthai Philipose, “ Mapping and Localization with RFID Technology ”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.1015-1020, 2004.4.
- [18] Byoung-Suk Choi, Joon-Woo Lee, and Ju-Jang Lee, “ Localization and map-building of mobile robot based on rfid sensor fusion system ” Proc. 6th IEEE Int'l Conf. on Industrial Informatics (INDIN2008), pp. 412-415, 2008. 7.