

スポットライトを用いた屋内での探し物発見支援システム

中 田 豊 久[†] 金 井 秀 明^{††} 國 藤 進[†]

部屋の中でテレビのリモコンや携帯電話などをなくすことがある。本論文では、このような屋内での探し物を手助けするシステムについて提案する。システムは、隠れた位置にある物であっても高い精度で位置を計測するために、超音波方式と Active RFID からの計測値をパーティクルフィルタによって融合する。また、測定した位置をスポットライトで照らすことによって、ユーザに分かりやすく探し物の位置を知らせる。このシステムを、構築した実験環境で性能試験を実施した。また、関連システムとの比較実験により、提案システムが探し物を早く発見できることを明らかにした。

A Support System for Finding Lost Objects Using Spotlight Indoors

TOYOHISA NAKADA,[†] HIDEAKI KANAI^{††} and SUSUMU KUNIFUJI[†]

We propose a support system for finding lost objects indoors. The system employs active RFID and ultrasonic position detection to detect the position of a lost object. Even if a lost object is hidden by others, the system enables us to find the position by the two position detection devices. Since the system illuminates the position by using a spot of light, user can find it easily. From an experiment, we made clear ability of the system and the advantage of time to find it over a related system.

1. はじめに

部屋の中でテレビのリモコンや携帯電話などをなくすことがある。このような探し物は、たとえば、怪我をしたときに薬が見つからないときや、急いでいるときに自動車のキーが見つからないような緊急を要するときは、特に困る問題である。

物をなくす原因には、部屋が片付けられていないなどの環境に依存するもの、どこに置いたのかを忘れてしまう記憶に起因するもの、他者が勝手に持ち出してしまうという自分では制御し難い要因などが考えられる。このような探し物を支援する方法としては、環境を改善するための整理方法の工夫、記憶を呼び起こすことを支援する方法、そして物の位置を何かしらの機器で管理する方法などが考えられる。本論文では、この中でも計算機の支援によって探し物を手助けしてくれるシステムについて議論をする。

探し物を支援するシステムに必要な機能について、

我々は以下のように定義した。

共用性 他者が移動した物を捜せる。

透過性 隠れた位置にある物を捜せる。

即時性 すぐに探し物を見つけ出せる（ユーザが物を捜そうとしてから、発見するまでの時間が短い）。
タグ不要 あらかじめ物に機器（タグ）を付けなくても捜せる。

どの機能についても重要であるが、本論文では特に即時性について注目する。

即時性を向上させるためには、支援システムの機構や構成ではなく、インタフェースが重要になると考える。つまり、システムがすでに探し物の位置を知っているならば、それをどのようにして伝えるかが、即時性にとって大きな要因となると考える。たとえば、「机の上にあるよ」「ベッドの下にあるよ」などのように、人が教えるように物の場所を音声によって伝える方法が分かりやすいかもしれない。しかしこのような方法を実現するためには、渡辺ら¹⁾の研究のようにランドマークとなる物の位置をすべて管理しなければならないし、また、それらのランドマークが本当にユーザにとって分かりやすいのかを検証し、その位置の変更だけでなく、ユーザの認識の変化についてもシステムが維持・管理していかなければならない。一方、あらかじめ紛失する可能性のある物に小さな機器（タグ）を

[†] 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

^{††} 北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター
Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

付けていれば、捜せる物は限定されるが、そのタグが自らの位置を通知することも可能になる。携帯電話機をなくしたときに、他の電話機から電話をかけて、着信音やバイブレーションを頼りに捜すことと同じである。しかしこのような方法も、携帯電話が何かに隠れていて、音がよく聞こえないときには、捜すのが困難なときもある。

以上のことより、我々は外部からスポットライトを当てる方法を提案している^{2),3)}。システムは、たとえ捜し物が隠れた位置にあっても、その付近にスポットライトを照射する。視覚情報により位置を通知するため、ユーザにとって分かりやすいことが特徴である。システムは外部から捜し物にスポットライトを当てるために、捜し物にあらかじめ付けられたタグの位置を計測している。タグの位置をシステムが測定しているため、誰が物を移動してもその物を捜し出すことができるという共用性を実現する。また透過性を保ちつつ即時性を高めるために、性質の異なる2種類の位置計測器を使用し、隠れた位置にあるものであっても条件によっては精度の高い計測を実現する。その2つの計測器からの観測情報は、パーティクルフィルタによって融合される。

本論文は次のように構成されている。2章では、関連研究について述べ、提案するシステムの特徴を明らかにする。3章でシステム構成について説明する。4章では、構築した実験環境とそこでの性能試験について述べる。5章では、提案システムと最も類似するワイヤレスロケータという聴覚情報による捜し物発見支援システムとの比較実験により、提案するシステムが即時性について優れていることを示す。そして最後に6章でまとめ、今後の課題について述べる。

2. 関連研究

捜し物を支援するシステムや機器についてのシステム構成を表1に示す。その表に基づいた各システムの機能一覧を表2に示す。表の番号の2,3は音を使ったシステム、4は3次元の位置を取得するシステム、5,6は光学式のタグを使うもの、7,8はエンコードされた光を外部から照射する方法、9,10は画像認識による方法である。以下にそれぞれのシステムについて述べる。

ワイヤレスロケータは、The Sharper Image Inc.が販売している音による捜し物発見支援システムである。ユーザが捜し物をするときに手に持つ機器（コントローラ）と、捜し物にあらかじめ付けておくタグから構成されている。ユーザがコントローラのボタンを

押すに対応する電波が発信し、それを受けたタグが約70 dBのピーピーという高音を発する。ユーザはその音を頼りに捜し物の場所を発見する。Hide and Seek⁴⁾は、赤外線を外部から照射して、それを受けたタグが音を発するシステムである。ワイヤレスロケータとの違いは、タグで測定する静電容量の変化によってタグの発する音を変化させることである。この機能により、ユーザがタグに手を近づけると、静電容量が変化して発する音が変わり、ユーザは近くにタグがあることを知ることができる。

GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) は、4つ以上の人工衛星から送られる電波を地上で受けて、電波の送受信の時間差から距離を求め、3次元の位置を測位する方法である。

SearchLight⁵⁾は、可動式のプロジェクタにカメラを搭載し、そのカメラで捜し物に付けられた光学式のタグ⁶⁾の位置を認識して、捜し物にスポットライトを照射するシステムである。HMDによる拡張現実⁷⁾では、ユーザはカメラとシースルーのHMDを身につける。カメラが認識する光学式タグの場所をハイライトさせることにより捜し物の発見を支援する。

FindIT⁸⁾は、ユーザが手に持っているライトから照射されるフラッシュライトをタグが受けて、そのフラッシュライトにエンコードされたIDに対応するタグがLEDを点灯させるシステムである。RFID⁹⁾は、ユーザが手に持つプロジェクタによって照射される光をタグが読み取り、電波でその読み取った情報を伝送する。プロジェクタから見た相対的な位置を知ることができるシステムである。

外部カメラによる画像認識¹⁰⁾は、キッチンやベッドなどにカメラを配置して、画像認識によってあらかじめ登録された物がその領域にあるかどうかを取得し続けるシステムである。ユーザは、捜し物が最後に撮影された映像を見て、捜し物がどこにあるのかを知ることができる。I'm Here!¹¹⁾は、ウェアラブルカメラによって捜し物の画像を自動的に撮り続けるシステムである。ユーザが捜し物をするときには、最後に記録された捜し物の画像の周りを見て、それがどこにあるのかを知ることができる。

我々の提案するシステムは、システムが位置を測定することにより共用性を、電波を用いることで透過性を有する。また、測定精度の高い超音波方式と併用し、かつ、スポットライトを用いて分かりやすくユーザに位置を知らせることにより即時性を高めている。提案システムと同様に、共用性、透過性、即時性を実現するワイヤレスロケータとは、即時性について我々のシ

表 1 捜し物を支援するシステムや機器のシステム構成一覧

Table 1 System architectures of support systems for finding lost objects.

システム名	検出器 の配置	検出器 の種類	捜し物 に付け るタグ	位置通知の種類
1. 提案システム	環境	超音波, 電波	あり	外部からの可視光
2. ワイヤレスロケータ	人	電波	あり	タグからの可聴音
3. Hide and Seek ⁴⁾	人	赤外線	あり	タグからの可聴音
4. GPS	環境	電波	あり	緯度経度
5. SearchLight ⁵⁾	環境	カメラ	あり	外部からの可視光
6. HMD による拡張現実 ⁷⁾	人	カメラ	あり	外部からの可視光
7. FindIT ⁸⁾	人	可視光	あり	タグからの可視光
8. RFIG ⁹⁾	人	可視光	あり	外部からの可視光
9. 外部カメラによる画像認識 ¹⁰⁾	環境	カメラ	なし	画像
10. I'm Here! ¹¹⁾	人	カメラ	なし	画像

表 2 捜し物を支援するシステムや機器の機能一覧

Table 2 Functions of support systems for finding lost objects.

システム名	共用性	透過性	即時性	タグ 不要	捜索可能範囲
1. 提案システム	○	○	○	× ₆	検出器の周り
2. ワイヤレスロケータ	○	○	○	× ₆	捜索者の周り
3. Hide and Seek ⁴⁾	○	× ₂	○	× ₆	捜索者の周り
4. GPS	○	1	× ₄	× ₆	主に屋外
5. SearchLight ⁵⁾	○	× ₃	○	× ₆	検出器の周り
6. HMD による拡張現実 ⁷⁾	○	× ₃	○	× ₆	捜索者の周り
7. FindIT ⁸⁾	○	× ₃	○	× ₆	捜索者の周り
8. RFIG ⁹⁾	○	× ₃	○	× ₆	捜索者の周り
9. 外部カメラによる画像認識 ¹⁰⁾	○	× ₃	2	○	検出器の周り
10. I'm Here! ¹¹⁾	× ₁	× ₃	× ₅	○	捜索者の行動範囲

×₁:「検出器の配置」が「人」でかつ「捜し物に付けるタグ」が「なし」のため.

×₂:「検出器の種類」を透過性のある「電波」に変更すれば対応できる.

×₃:「検出器の種類」に「電波」を含まないため.

×₄:測位誤差の数メートル範囲内から見つけ出すことは容易ではない.

×₅:画像に写る背景から,どこであるかを思い出さなければならないため.

×₆:「捜し物に付けるタグ」が「あり」のため.

1:電波が微弱なため,屋内や鞆の奥底に受信機があると測位できないことがある.

2:画像から実空間へのマッピングが必要なため.

ステムの方が優れていることを 5 章の比較実験で示す.

3. システム構成

ここでは,提案する捜し物発見支援システムの構成について述べる.

3.1 概要

紛失する可能性のある物にはあらかじめタグを付けておく.システムは,そのタグの位置を超音波と Active RFID によってつねに取得し続けている.ユーザが捜し物をするときには,専用の PDA を用いて,捜したい物に対応するボタンを押す.システムは環境に設置された可動式ライト(ムービングライト)を操作して,捜し物のある場所にスポットライトを照射する.ユーザはスポットライトの中や付近を捜すことによって,捜し物を発見することができる.

捜し物が隠れた位置にあっても高精度で位置を取得するために,特徴の異なる 2 種類の位置計測機(Active RFID と超音波方式)を使用する.その 2 つの計測情報を,パーティクルフィルタを用いて融合し,確率的に位置を取り扱う.確率が高いときには,小さなスポットライトを用いてピンポイントで照射する.位置の確率が低いときには,測定位置を中心とした大きなスポットライトを照射して,そのライトの中やその付近に捜し物があることを伝える.

3.2 ハードウェア構成

図 1 にハードウェア構成を示す.捜し物の位置を特定するための機器として,Active RFID(RF Code 社)と超音波方式の位置計測器(古河機械金属社)を使用する.計測した位置をユーザに知らせるためには,ムービングライト(マーチン社)を使用して実空間に

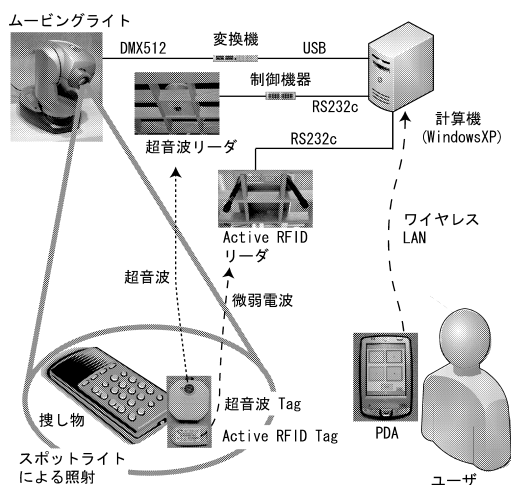


図 1 ハードウェア構成

Fig.1 Hardware of the system.

スポットライトを照射する。ユーザは手に持つ PDA によって何を捜したいかをシステムに要求する。

Active RFID は、300 MHz 帯の電波を定期的に発する発信機(タグ)とその電波を受信するリーダによって構成されている。タグは約 60 mm ほど、リーダは約 120 mm ほどの大きさである。電波の届く距離は、我々の実験した環境においては、7~8 m であった。今回使用したタグの電池寿命は約 3 年である。タグには固有の ID が割り当てられ、個別に識別することが可能である。タグは 7 秒に一度、電波を発信する。電波を使用しているため透過的に位置を計測できるが、測位精度は悪い。

超音波方式の位置計測器は、制御装置類とリーダとタグにより構成される。制御装置は約 250 mm ほど、リーダは約 80 mm ほど、タグは電池式の小型のもので約 40 mm ほど、胸に付けるネームプレートの形をした充電式のもので約 90 mm ほどの大きさである。超音波の届く距離は約 7 m である。タグが発する超音波を受信するまでの時間によって距離が換算されるため、3 つ以上のリーダで超音波を受信すると、タグの 3 次元の位置を特定することができる。その測定誤差は、約 50 mm である。使用している超音波は、中心周波数 40 KHz である。電池寿命は、充電式のタグで約 10 日間である。Active RFID と同様に個々のタグに ID が割り振られており、個別に識別可能である。タグの位置の更新は、約 1 秒ごとに行われる。Active RFID よりも高精度で測位できるが、超音波を使用しているため、タグとリーダとの間に遮蔽物があると測定することができない。

ムービングライトは、従来は舞台などの照明機器と

して広く使われている機器であり、近年では店舗の広告を壁や地面に表示する機器としても利用されている。ゴボと呼ばれるムービングライトのランプの前に配置されるプレートを切り替えたり、回転させたりすることによって、スポットライトの色や形を変えることができるようになっている。計算機からは DMX512 プロトコル によって照射方向やゴボの制御を行うことができる。DMX512 プロトコルとは、米国劇場技術協会 (USITT) によって 1990 年に制定されたハードウェアとプロトコルの規格である。ムービングライトだけでなく、舞台でのスモークや音響などの演出効果を統一して扱えるようにした規格となっている。

PDA は、システムの入力インタフェースとして使用する。ワイヤレス LAN によって計算機に接続されている。

3.3 捜し物の位置の取得方法

透過的に位置を測定するためには、電波による測位が必要である。また即時性を高めるためには、正確に位置を測定できることが重要である。電波では精度が悪く、しかし超音波では、高精度な測定は可能であるが、隠れた位置にある物の位置を測定することはできない。そこで本システムでは、透過性を保ちつつ、即時性を向上させるために電波と超音波による測位を併用する。この 2 つの機器の測定は、パーティクルフィルタによって融合する。パーティクルフィルタは、観測情報を非同期、独立に扱うことができるため、たとえば 2 つの機器からの観測情報が揃わなくても処理をすることが可能である。また、観測情報を確率分布として表すことができるため、その確率分布の違いによってそれぞれの位置計測器の特徴の違いを表すことができる。

また、パーティクルの広がりによって位置計測の確信度を推定することができることも特徴の 1 つである。推定位置の確信度は、本研究ではスポットライトの径に反映されてユーザに伝えられる。もしも確信度が分からない場合、確実に捜し物にスポットライトを当てるためには、位置精度の最も悪い状況に合わせてスポットライトの径を大きく決定しなければならない。たとえ精度良く測定できていても径の大きなスポットライトの中をユーザが捜さなくてはならないため、即時性を損なうことになってしまう。一方、確信度が分かる場合には、高精度で位置を計測できているときには小さな径でピンポイントで捜し物の場所を示し、即時性を高めることが期待される。

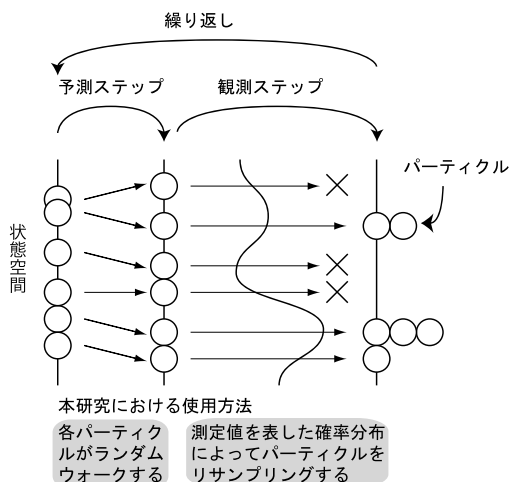


図2 パーティクルフィルタ手法と本研究における使用方法
Fig. 2 An algorithm of particle filter and the usage of it in our study.

さらに、パーティクルフィルタの計算コストは低い¹²⁾。たとえば、位置推定の計算に大きな時間がかかる場合には、すぐにユーザが捜し物を開始できないため、即時性を損なってしまう。パーティクルフィルタはほぼリアルタイムに処理をすることができるため、計算時間に影響する即時性の低下はない。

本研究ではこれらの理由により、パーティクルフィルタを用いて2種類の位置計測器を融合する。

3.3.1 パーティクルフィルタとは

パーティクルフィルタとは、粒子（パーティクル）を用いた、一般状態空間モデルの近似的な状態推定である¹³⁾。1960年代に統計力学の分野で提案された逐次モンテカルロ法¹⁴⁾の特殊系であり、画像解析の分野におけるConDensation法と同じである。非線形なモデルを表現できるという特徴だけでなく、計算コストが低いという利点もある。

パーティクルフィルタでは、状態空間に配置されたパーティクルを、予測と観測（フィルタリング）の2つのステップで変化させ、パーティクル全体で非線形なモデルを表現できるようにしている。図2に処理の手順を示す。まず状態空間にパーティクルを配置する。予測ステップでは、それぞれのパーティクルをある予測に基づき移動させる。次に観測ステップでは、与えられた観測情報からパーティクルをフィルタリングする。この2つのステップを繰り返し実行する。

予測、観測ステップには様々な処理を適用することができるため、パーティクルフィルタの応用範囲は広い。また、計算機による実装が容易であることも、様々な分野で利用されている要因となっていると考えられ

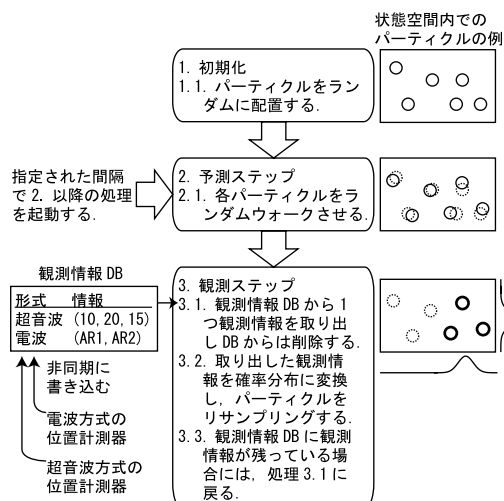


図3 本研究におけるパーティクルフィルタの実装方法
Fig. 3 An implementation of particle filter on our research.

る。たとえば、Hightower ら¹⁴⁾は、人や物の位置情報の推定に利用している。

3.3.2 本研究におけるパーティクルフィルタの実装方法

前項で述べたパーティクルフィルタを、具体的に本研究では、図3のように実装した。まず、システム起動時にパーティクルは初期化される。そしてある決められた間隔で、処理2, 3の処理を繰り返し起動する。また、この処理2, 3とは非同期に、位置計測器は得られた観測情報を位置計測DBに書き込んでいる。よって通常は、位置計測器から得られる観測情報をすぐに処理するために、処理2, 3の起動間隔（図2の予測、観測ステップの繰り返し間隔に相当する）は、位置計測器の観測情報を得る間隔よりも十分に短く設定される。

捜し物はどうのような移動をするのかをあらかじめ決めることはできないため、パーティクルフィルタの予測ステップでは、各パーティクルをランダムに移動させる。本研究における実装法では、処理3が実行されるときに観測情報がない場合には、そこではなんにも処理をしない。よって観測情報がない場合には、処理2.のランダムウォークのみを繰り返し実行し、パーティクルは徐々に広がっていく。これは、徐々に捜し物が存在する可能性のある場所が広がっていくことを表している。可能性のある場所が広がるということは、捜し物が存在する確率が全体的に低くなることであり、位置推定に対する確信度が下がることも表している。

また、処理3の実行時に複数の観測情報が得られている場合には、それらを1つずつ確率分布に変換して

パーティクルを複数回リサンプリングする．たとえば 3 つの観測情報が得られていれば，3 回のリサンプリングをすることになる．複数の観測情報を 1 つの確率分布とはせず独立に扱うため，観測間隔の異なる計測器を取り扱え，また，拡張性も高い．たとえば，新しい種類の位置計測器をシステムに導入しても既存部分を変更することなく新しい機器用の確率分布を定義するだけでよい．様々な種類のセンサを併用して利用することの多いユビキタスシステムにおいては，このような拡張性は有益である．

本手法の特徴は，予測ステップにランダムウォークを使用して，観測情報が得られないときに徐々に位置推定の確信度が下がることを実現することと，Active RFID による観測情報を等脚台形の形をした確率分布として表し，パーティクルの広がりや測定誤差に関係性を持たせることである．これらのランダムウォークや確率分布についての詳細は，次項以降で述べる．

この提案するパーティクルフィルタの実装方法は，ランダムウォークを物の移動予測として使用しているため，移動する法則が分からない移動体の位置推定に汎用的に利用できると考えている．一方，移動する法則があらかじめ分かっている場合には，その法則をランダムウォークの代わりに使用し，より精度の高い位置推定が可能となる．

3.3.3 ランダムウォークによる予測

隠れた位置にある物は，超音波による計測ができないことが多い．しかし，直前まで超音波による高精度な位置計測が行われていたならば，その位置に実際に捜し物がある可能性は高いといえるだろう．隠れた状態が長時間経てば，最後の計測された超音波の情報は信頼できず，低精度の Active RFID による計測精度の範囲内で，捜し物がその位置にあると考えられる．このようなことをパーティクルフィルタによって表現するために，予測ステップにランダムウォークを用いている．捜し物がどこに移動するかを特定できないため，ランダムにパーティクルを移動させる．そしてランダムウォークによるパーティクル群の広がりを，パーティクル群の位置の標準偏差によって表すと，式 (1) となる．

$$SD = D\sqrt{n} \quad (1)$$

ここで， SD はパーティクル群の標準偏差， D はランダムウォークの 1 回のステップで移動する距離， n はランダムウォークのステップ回数である．

3.3.4 位置の測定値を確率分布として表現

使用する位置計測器は，その構成の違いから精度や誤差の発生仕方が異なる．よって，それらを融合し

た位置計測は，線形なモデルでは扱い難くなっている．そこで，それぞれの位置計測器の特徴をパーティクルフィルタの観測ステップにおけるフィルタリングと定義して，非線形なモデルで融合した位置計測を実現している．具体的には，それぞれの位置計測器からの計測情報は，その特徴を表した確率分布によって表現する．そして観測ステップのフィルタリングでは，その確率分布によってパーティクルをリサンプリングする．

本研究で使用した超音波式の位置計測器は，3 次元位置 (x, y, z) を誤差を含めて出力する．超音波による測位の誤差には，超音波が環境のどこかに反射して受信されてタグからリーダまでの距離を誤認することや，受信を処理するときに発生する量子化誤差などが考えられる．我々の実験環境下では，製品仕様である約 50 mm よりも小さな誤差は頻繁に発生するが，それ以上の誤差はあまり観測されることはなかった．このような経験から我々は，個々の誤差の原因には踏み入らず，総合して超音波計測器の誤差は，正規分布に従うと仮定した．式 (2) によって示される正規分布の平均を観測情報の位置 (x, y, z) として，誤差の大きさを分散で表すこととした．

$$f(x_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\{-x_d^2/2\sigma^2\} \quad (2)$$

ここで， x_d はパーティクルの位置から位置計測器の出力する位置までの距離を示す．

一方，Active RFID は，超音波のような高精度で位置を取得することが難しい．タグが発する電波は，付近の金属物や反射によって複雑に変化してリーダに届くからである．そこで本研究では，正規分布を頂点付近と斜面の 2 つに簡略化した等脚台形の形をした分布を定義する．正規分布の場合，電波強度が強くなるほど距離が短いと表される．一方，等脚台形の分布の場合，ある一定の電波強度以上となると，ある一定の範囲内に等確率でタグがあると表される．よって精度は期待できないが測定誤差にロバストになると思われる．この分布の上辺の長さを $2a$ ，下辺を $2b$ としたときの確率密度関数は，式 (3) のようになる．

$$f(x_d) = \begin{cases} \frac{1}{a+b} & x_d \leq a \\ \frac{\frac{x_d}{a^2-b^2}}{a^2-b^2} + \frac{b}{-a^2+b^2} & a < x_d \leq b \\ 0 & b < x_d \end{cases} \quad (3)$$

x_d は，Active RFID リーダの位置とパーティクルの位置との距離である．距離が a 以内であれば，一定の確率で Active RFID リーダの周りになるとなり， a から b の間であれば，距離が増えるにつれて線形で

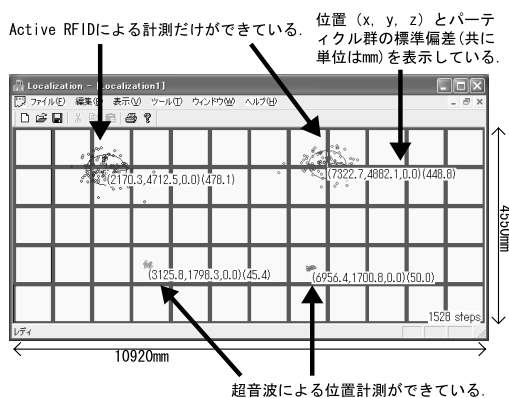


図 4 パーティクルフィルタの実行例

Fig. 4 An example of execution of particle filter.

確率値が減少し、 b を超えると 0 になる．等脚台形の面積が 1 であることから、この分布が確率分布であることが分かる．

3.3.5 パーティクルフィルタの実行例

図 4 に、後述する実験環境（図 6）で実施した、本システムにおけるパーティクルフィルタの実行例を示す．図中には 4 つの捜し物は、上 2 つは Active RFID のみによる測位ができていて、下 2 つは超音波による測位ができていて、パーティクルの広がりを出すために、パーティクル群の標準偏差を円で示しその数値を表示している．超音波による測位ができていてパーティクル群の方が、Active RFID のみのものに比べてより集まっていることが分かる．

3.3.6 本研究における位置計測方法の長所と短所

隠れた位置にある物は超音波方式で位置を取得できないため、Active RFID のみによる低精度の測定となる．しかし本論文において提案する方法によれば、隠れる直前に計測された超音波方式による位置情報を、パーティクルがランダムに広がるまで保持し続けている．よって、ある一定の時間内であれば高精度な位置を推定することができる．

また、本論文では 2 種類の確率分布を使用しているが、それぞれは依存せずに独立してパーティクルフィルタの観測情報として与えられる．たとえば、計測精度をさらに向上させるために新たな位置計測器をシステムに導入しても、既存の処理を変更することなく機器を追加することができる．これは、様々なセンサを融合して利用するユビキタスコンピューティングにおいては利点である．

ランダムウォークによるパーティクルの広がり、パーティクルフィルタが推定する位置の確信度を表していると見ることができる．位置を測定する機器は、

たとえば電波を利用する Active RFID であっても、近くに金属などがあった場合には測定できないことがある．よって最後に得られた観測情報からの経過時間によって、その観測情報の場所に捜し物がある可能性が決まってくると考えられる．たとえば数秒前にある位置にあるという観測情報が得られれば、現在もそこに物がある可能性が高いが、数日前の観測情報しかない場合には、数秒前に比べてそこに捜し物がある可能性が低いとみることができる．我々のパーティクルフィルタの実装方法は、このような現象を表すことができるようになっている．本研究と同様に、Hightower¹⁴⁾ もパーティクルフィルタを位置推定に使用している．しかし Hightower らの実装方法では、観測情報が得られていないときにパーティクルは移動しないため、数日前の観測情報と数秒前の観測情報を区別することはできない．

本手法の短所は、捜し物の位置が変わったときに追従するための時間がかかることである．パーティクルがランダムウォークで広がる速さは、捜し物がどれだけ移動しやすいかによって決められる．たとえば、あまり動かないと設定すれば、その物が隠れても、高精度で推測する時間が長くなる．しかし、その物が移動すると、推定値がその物の位置を示すまでに多くの遅延が生じる．

3.3.7 位置推定の遅延の補完方法

推定位置の追従が遅いという短所を、システムとしては次のような方法で補おうとしている．ユーザが捜し物を要求したときには、最初は、計測し続けている位置を基に、スポットライトを照射する．スポットライトは、ある一定時間照射し続けると、一度オフするようになっている．それでもユーザが捜し物を発見できず、再度要求を発行したときには、パーティクルフィルタの各パーティクルを初期化（状態空間内にランダムに配置）するようになっている．初期化によってパーティクルが状態空間内に一様に配置されるため、次の観測情報にすぐに追従できるようになる．また、このパーティクルの初期化処理は、1 回の捜し物探索の間で 1 回のみ実施されるようになっている．初めてスポットライトが消灯した前後にだけ、このパーティクルの初期化処理を実行するようになっている．2 度目のスポットライトの消灯の前後で、再度捜し物の要求をしたときには、パーティクルの初期化は行わない．

3.4 スポットライトの照射

空間内の任意の位置をユーザに知らせるために、本システムはその場所にスポットライトを照射する．実空間内の任意の場所を示す手法は、たとえばレーザが

インタを用いた手法¹⁵⁾などが従来から提案されている．このような従来手法と比べて，我々の手法は，位置を知らせると同時に位置推定の確信度についてもスポットライトの径を用いて表しているところが特徴である．たとえば高精度で位置が測定されている場合には，その場所にピンポイントでスポットライトを照射し，精度が悪い場合には，大きめの径のスポットライトを照射する．

次項以降では，スポットライトを照射したい方向に向けるためのムービングライトのパンとチルトの計算方法について，また，位置精度からスポットライトの径を決定するための方法について述べる．

3.4.1 パンとチルトの計算

本システムで使用したムービングライトは，横回転（パン）と縦回転（チルト）の2つの回転軸によって照射方向を決めることができる．その構造は2軸ロボットアームと同じであるため，ロボット工学における逆運動学問題^{16),17)}によって，照射したい位置からパンとチルトの数値を求めることができる．またパン，チルトの計算の前に，位置計測器の座標の中でのムービングライト機器の位置や向きを求めておかなければならない．本研究では，一般的にキャリブレーションと呼ばれるその計算と，パンとチルトを求める計算を合わせて以下のように処理をする．

位置計測器の座標系の原点からムービングライトの位置までを平行移動，ムービングライトの向きを2つの回転変換とすると，キャリブレーションは3軸のロボットアームと同じ構造となる．よってパンとチルトの2軸と合わせて5軸のロボットアームと見なし，キャリブレーションによって求められる平行移動，2つの回転変換，および照射したい位置を入力として，パンとチルトの角度を求める．このときに，ムービングライトの座標系（位置と向き）を T_m ，位置計測器の座標系を T_l とすると，両者の関係は式 (4) となる．

$$T_l = A_{ry} A_{rz} A_t A_{rp}^{-1} A_{rt}^{-1} T_m \quad (4)$$

式 (4) は，ムービングライトが捜し物を照射している状態からパンとチルトを0度に戻し，ムービングライトの設置された位置や向きを変換式として与えていくと位置計測器の座標系となる，という式である．パンとチルトを0度にする変換は， A_{rp}^{-1} ， A_{rt}^{-1} によって与えられる．ムービングライトの設置位置に対する平行移動変換は A_t ，向きに対する回転変換は Y 軸回りの A_{ry} と，Z 軸周りの A_{rz} で与えられる．

次に，ムービングライト座標系での捜し物の位置を P_m ，位置計測器の座標系での同じ捜し物の位置を P_l とすると，式 (4) から求められる両者の関係は，式 (5)

となる．

$$P_m = A_{rt}^{-1} A_{rp}^{-1} A_t A_{rz} A_{ry} P_l \quad (5)$$

よって，捜し物の座標からムービングライトのパンとチルトを求めるには，機器の設置後のキャリブレーションで求めた A_t ， A_{ry} ， A_{rz} と，システム実行中に観測情報として得られる P_m ， P_l から A_{rp} と A_{rt} を求めればよい．

3.4.2 スポットライトの径の大きさ

システムが照射するスポットライトの径の大きさは，パーティクルフィルタによって推定される位置の確信度に比例する．具体的には，パーティクル群の標準偏差をスポットライトの半径の大きさとしている．

使用したムービングライトによって照射できるスポットライトの径は，ムービングライト内でランプの前に置かれる「ゴボ」と呼ばれるプレートを計算機からの信号によって切り替えることで変えることができる．このゴボの上での円の大きさと，投射面にできるスポットライト径との関係は，式 (6) となる．

$$R_r = \frac{R_g D}{F} \quad (6)$$

式 (6) の R_r は，スポットライトの半径でありパーティクル群の標準偏差でもある． R_g はゴボ上の円の半径， D はムービングライトから照射する実空間の位置までの距離， F はムービングライトの機器によって一意に決まる焦点距離である．ゴボを装着できる枚数には制限があるため，実際には，照射したいスポットライト径に最も近いゴボを選択して照射する．

照射されるスポットライトは，投射面の形状によって大きく変わる．本システムでは，カメラなどのデバイスを用いないため，どのような形状のスポットライトが実際に照射されているかまでは考慮していない．

3.5 システムの入力インタフェース

本研究では，無線 LAN 機能を搭載した PDA を用いて入力インタフェースを構築している．PDA の画面には，捜し物に付けたタグの数だけのボタンが表示されている．そのボタンを押すと，無線 LAN によって計算機にわたり，対応するタグにスポットライトが当たる．

このような入力インタフェースは，5章で述べる実験における比較対象システムの入力インタフェースと類似させることを目的として構築したものである．5章で述べる実験では，入力インタフェースについては比較対象としていない．被験者への捜し物の位置の通知方法の違いのみを評価している．よって本システムの入力インタフェースとしては，たとえば，Shinnishira⁴⁾のように音声入力を用いた入力インタフェースに

よってシステムを構成してもよいと考えている．音声入力であれば，PDA を紛失して捜し物ができない，という問題を回避することもできる．

4. 実験環境と性能評価

ここでは，位置計測の精度やスポットライトの照射精度，および，それらを実施した実験環境について述べる．

4.1 実験環境について

4.1.1 各機器の設置

提案システムを実験した環境の概観を図 5 に示す．そして，図 6 には，実験環境の寸法と機器の配置箇所を示す．この実験環境では，環境内のどこに捜し物があっても，透過的な位置計測が可能となるようになっている．また，どこであって十分な明るさでスポットライトを照射できるように，2 つのムービングライトを設置している．

4.1.2 パーティクルフィルタの設定

位置情報の更新には，更新の速い超音波式であっても約 1 秒の時間を必要とする．この位置情報をもらさず処理するために，パーティクルの更新間隔は，それよりも早い 0.5 秒ごととした．また，ランダムウォークで移動する距離は，すべてのパーティクルが同じ位置にある状態から最初の 1 時間で，パーティクルの広がり（パーティクル群の標準偏差）が 1 m となるように設定した．超音波方式の観測情報は，仕様では誤差が約 50 mm であるため，観測位置を平均値とした標準偏差 50 mm の正規分布として表した．Active RFID は，リーダの周りの半径 2,500 mm 以内では，ほぼ確実に電波を受信するように受信感度を調整し，受信領域が隣り合うリーダ間で重なり合うようにした．そしてその設定した受信感度において約 8,000 mm 先のタグからの電波を受信することがまれにあったため，等脚台形の形は，上辺が 2,500 mm，下辺が 8,000 mm の分布として表すようにした．

4.1.3 パーティクルフィルタの初期化について

使用したワイヤレスロケータはユーザが要求をしてから約 10 秒間，タグは音を鳴らし続ける．この仕様に合わせて，スポットライトが点灯している時間を 10 秒とした．ユーザが一度システムに要求を出すと，10 秒の間スポットライトは点灯し続ける．10 秒後に消灯したときに，すぐに再度要求を発行すると，3.3.7 項で述べた，パーティクルの初期化処理が行われる．

4.2 等脚台形の分布についての評価

本システムでは，従来の研究ではあまり用いられない等脚台形の形をした確率分布によって Active RFID



図 5 実験環境の様子

Fig. 5 The experimental environment.

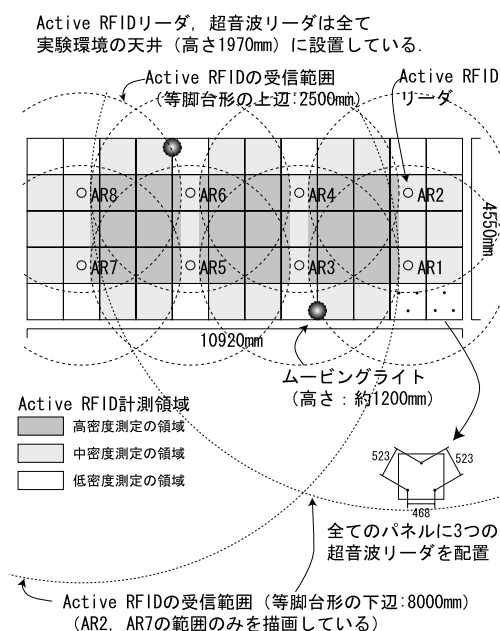


図 6 実験環境における機器の配置図

Fig. 6 Arrangement of devices in our experiment.

からの観測情報を表す．ここでは，実験結果からその利点について述べる．

実験は，図 6 の環境でランダムに 102 カ所の場所に Active RFID タグを置き，各リーダでの受信状況を収集した．その観測情報を，正規分布で表す場合と，等脚台形の分布として表す場合において推定位置と，真の位置との誤差がどのようになるのかを計算した．どちらの分布であってもパーティクルフィルタの予測ステップにはランダムウォークを用いた．その測定誤差を図 7 に示す．正規分布，等脚台形の分布とともに，標準偏差や上辺，下辺の大きさを変更してそれぞれ 3 種類ずつ調査している．ただし，この結果には垂直方向に対する誤差は考慮されていない．垂直方向の誤差

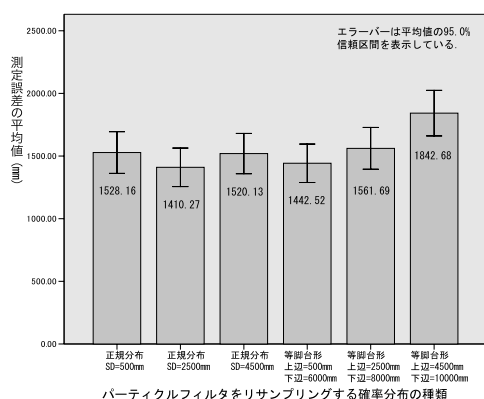


図 7 Active RFID の確率分布を様々に変えたときの位置精度について

Fig. 7 Measurement errors in several probability distributions.

も考慮する場合には、天井の高さである 1,970 mm を幅として持つ一様分布の標準偏差 568.7 mm をそれぞれに加えた値が、誤差の推定量と考えられる。等脚台形の上辺が 4,500 mm 以外は、ほぼ同じような測定誤差を示している。つまり、測定誤差のみを考慮するのであれば正規分布であってもほぼ同じである。

一方、パーティクルの広がり方は、正規分布と等脚台形の分布では異なる。正規分布によってリサンプリングする場合には、1 つの正規分布であっても複数であっても、1 つないし複数の最も確率の高い頂点を持つことになる。よって、十分に多い回数のリサンプリングを繰り返せば、その頂点にパーティクルは集まってくる。これに対し等脚台形の分布の場合には、最も確率の高い部分は面になっている。複数の分布でリサンプリングする場合には、その面の重なる部分があればその部分が最も確率の高い所になる。この重なる部分は、図 6 の Active RFID の計測領域のように受信するリーダの数が増えるほど小さくなるため、受信リーダ数とパーティクルの広がりに関連があることが期待される。そして受信リーダの数は測定誤差に影響するため、パーティクルの広がり測定誤差と関係性を持つと考えられる。そこで図 7 の測定値におけるパーティクルの広がり示すパーティクル群の標準偏差と、測定誤差との相関係数を求めた。その結果を正規分布と等脚台形の分布でまとめたものが、表 3 である。等脚台形であっても高い相関係数を示すわけではないが、正規分布に比べると、パーティクルの広がり測定誤差に関係性があることが分かる。

以上のように、予測ステップをランダムウォークとし、観測情報を等脚台形の分布として表すと、正規分布を用いる方法に比べて、パーティクルの広がり測定

表 3 図 7 の実験におけるパーティクルの広がり（標準偏差）と測定誤差との相関係数

Table 3 Correlation coefficient between spread of particles (standard deviation) and measurement error.

Active RFID の観測情報を表す確率分布	パーティクルの広がり測定誤差との相関係数	相関係数の有意確率 (両側)
正規分布	0.062	0.276
等脚台形の分布	0.237	0.000

表 4 透過的な位置計測 (Active RFID のみによる測定) の測定誤差 (2 次元)

Table 4 An error of measured value using only active RFID.

測定場所	測定誤差の平均	測定誤差の標準偏差	データ数
高密度領域	1,374.5 mm	648.4 mm	37
中密度領域	1,591.6 mm	910.0 mm	42
低密度領域	1,808.1 mm	925.1 mm	23

表 5 本システムにおける位置計測精度の分類

Table 5 Conditions of errors of measured value on the system.

状態	計測精度
超音波で測定できている	高精度
超音波で測定できている状態から Active RFID のみの状態になる	高精度から低精度に変わる
Active RFID のみで測定できている	低精度
位置が測定できない	最後に記録した位置を使用する
物が移動する	一定時間内は位置を誤認する

定誤差が関係性を持つことが分かった。

4.3 捜し物の位置計測の精度

図 7 で測定したデータを各領域に分けて測定誤差を求めた結果が表 4 である。この結果は、本システムの透過性の能力を示すものである。高密度でも約 1,300 mm の誤差が出る。一方、超音波の場合、実験環境内のどこであっても誤差 50 mm 以下で測定可能である。

次に、2 つの位置計測器の測定状態と、そのときの計測精度について表 5 にまとめる。ここでいう高精度の場合とは、超音波式の位置計測器の仕様である約 50 mm の誤差を持った計測のことであり、低精度の場合の場合は、Active RFID のみによる測定誤差 (表 4) である。超音波で測定できない場合とは、タグとリーダの間に遮蔽物がある場合である。新聞紙などのような物であってもタグの上に乗っていれば、超音波を受信することはできない。一方、Active RFID で測定できない場合とは、金属や水を含む物体によってタグが被われているような場合である。金属製の引き出し

にタグが入っていたりすると、タグからの電波を受信することはできない。

4.4 スポットライトの照射精度

使用したムービングライトでは、パンとチルトの角度を最小で約 0.00824 度、約 0.00412 度の単位で動かすことができる。よって、ムービングライトから 5 m 先のところでも約 0.719 mm 単位でスポットライトの位置を制御することが可能である。一方、位置計測器の精度は、精度の良い超音波方式であっても数十 mm の単位である。以上のことから、本システムにおけるスポットライトの照射精度は、ムービングライトの機器の性能には依存せず、位置計測の精度のみに依存する。

4.5 スポットライトの視認性

使用したムービングライトは 6 m 先で約 400 ルクス、10 m 先で約 150 ルクスのスポットライトを照射することができる。照度基準に関する JIS 規格 (JIS Z9110) によれば、作業室の全体照明としては 75 ~ 150 ルクスが適していると述べている。よって 6 m 以内であれば十分にスポットライトを視認できると考える。そこで実験環境には 2 台のムービングライトを設置して、最大距離が 6 m 以内となるようにした。また、ムービングライトの照射する光を直接見て、被験者が眩しさを感じないように、ムービングライトは台の上に配置し、捜し物は床付近に置き、できるだけ高い位置から下向きに照射するようにした。

5. 音による捜し物発見支援との比較実験

ここでは、音を利用した捜し物発見支援システムとの比較により、提案するシステムが、即時性において優れていることを明らかにする。また、共用性と透過性についても評価する。

5.1 目的

2 章で述べたように、提案システムと同じように共用性、透過性、即時性を実現する捜し物発見支援システムであるワイヤレスロケータ (The Sharper Image Inc.) との比較実験を行う。この 2 つのシステムの相違点は、捜し物の位置を「光」で伝えるか (提案システム)、「音」で伝えるか (ワイヤレスロケータ) である。この違いが、即時性に対してどのような影響を与えているのかを検証することが第 1 の目的である。即時性を調査する尺度としては、捜し物を発見するまでの時間を用いる。また、共用性と透過性についても評価する。共用性については、実験監督者が隠した物を被験者に捜してもらうことで検証する。透過性については、隠れた位置にある捜し物も対象とすることで評



図 8 実験で捜したタグ。左が音による捜し物支援システムのタグ、右が提案システムのタグ

Fig. 8 The tags used in the experiment. A support system for finding lost objects using sound uses the left tag, and our proposed system uses the right tag.

表 6 隠し場所の種類

Table 6 Types of the location in which tags are.

タイプ名	タグの状態
Type A	タグの全体が見えている
Type B	タグの一部が見えている (超音波による測位は可能)
Type C	タグの全体が隠れている (ワイヤレスロケータ用)
Type C1	タグの全体が隠れていて、 高精度な位置計測をしている
Type C2	タグの全体が隠れていて、 低精度な位置計測をしている
Type C3	タグの全体が隠れていて、 位置を誤認している

価する。

5.2 実験手順

大学院学生 11 人を被験者として実験を行った。被験者は、まず、提案システムとワイヤレスロケータの使い方について説明を受ける。そして、あらかじめ実験環境内に隠されたそれぞれのシステムのタグを捜してもらふ。実験に使用したタグは、図 8 のような形状と大きさをしている。被験者が、両システムのコントローラのボタンを押して捜すことを開始してから、タグを見つけ出すまでの時間を測定した。

タグの隠し場所は、タグが被験者からどのように見えるかによって、Type A, B, C の 3 種類に分類した。さらに、タグが隠れている場合の Type C には、提案システムの場合には、位置計測の精度状態によって 3 つの種類に分類した。その隠し場所の種類を表 6 に、被験者からどのように見えるかの例を図 9 に示す。また、このときにシステムがどのようにスポットライトを照射するのかを図 10 に示す。

Type C1 と C3 は、過渡的な状態である。Type C1 は、高精度計測状態から低精度に変わって、ある一定の時間内の状態である。Type C3 は、低精度計測の状態のままタグの位置が変わり、ある一定の時間内の状態である。ともに、十分に時間が経つと Type C2 の状態となる。Type C3 では、一時的に誤った位置

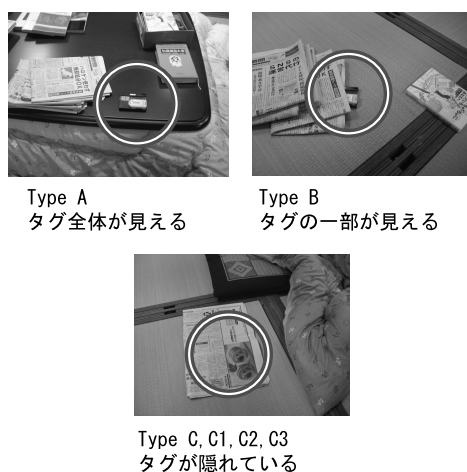


図 9 隠し場所の種類の例

Fig. 9 Examples of types of the location in which tags are.

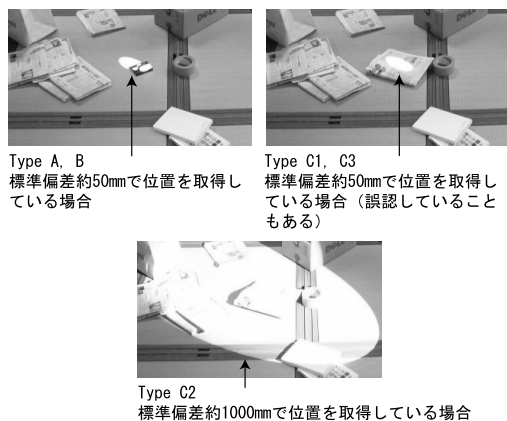


図 10 スポットライトのあたっている様子

Fig. 10 Examples of illuminated tags.

にスポットライトを照射し、場合によっては 3.3.7 項で述べた推定位置の追従性遅延の補完機能が働くことが起こりうる。しかし被験者に対しては、位置を誤認することや、補完機能については説明していない。被験者は、提案システムであれば、ただスポットライトの照射される箇所を捜し、ワイヤレスロケータでは、音のなる所を捜すということを行う。

測定は、1 人の被験者に対して、それぞれの隠し場所のタイプごとに 3 回の測定を行った。被験者がタグの隠し場所を予測できないように、実験領域内で隠す位置や、隠し場所の種類の実行順序をランダムに設定するようにした。

5.3 結 果

すべての被験者のすべての実験において、捜し物を見つけ出せないことはなかった。これは、捜し物は実

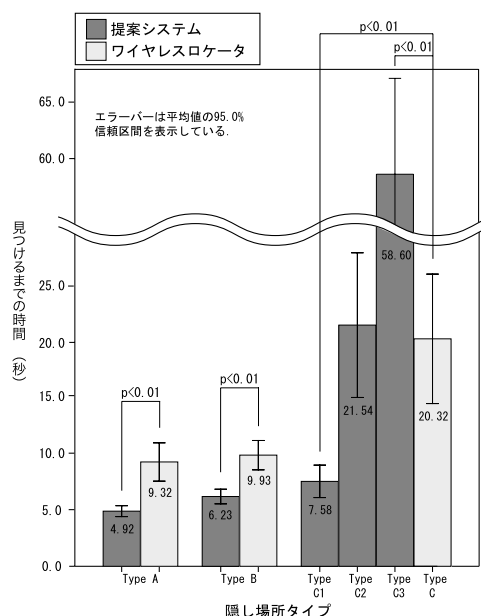


図 11 隠し場所タイプごとの発見までの時間

Fig. 11 Times for finding the object in types of the location which tags are.

験監督者が被験者に分からないように隠しているため、両システムに共用性があることを示している。また、Type C については隠れた位置にある物を捜しているため、両システムとも透過性についてもあることが分かる。

即時性については、タグを発見するまでの時間によって評価する。そのそれぞれの隠し場所の種類ごとのタグを見つけるまでの時間を図 11 に示す。この図より本実験において提案システムが優れていたところは、Type A, B, C1 の場合であることが明らかとなった。これらは、位置の精度が高精度で得られているときである。この中でも Type C1 は、超音波による高精度な位置計測ができない状態であるが、最後に得られた超音波方式からの観測情報と、現在観測できている電波からの情報に矛盾がないため、システムがまだその位置に捜し物があると推定している状態である。このような Type C1 がワイヤレスロケータの Type C よりも優れていたことは、本研究における位置情報の融合の効果が示されたところである。一方、Active RFID のみの位置計測のとき (Type C2) では、ワイヤレスロケータとの違いはなかった。さらに、あえて位置を誤認させて行った Type C3 では、ワイヤレスロケータの方が優れているという結果であった。

5.4 考 察

5.4.1 スポットライト径の大きさと即時性について

図 11 の Type C1 と C2 のユーザから見える違い

は、スポットライトの径の大きさが違うことである。同じように隠れた位置に捜し物があり、そこをスポットライトで照射していても、スポットライトの径の大きさが異なると、捜し物を見つけるまでの時間が異なることが示されている。本研究で提案するパーティクルフィルタの実装方法は、超音波方式と Active RFID の観測情報を異なる確率分布として表し、また、Active RFID については等脚台形の分布とすることによってパーティクルの広がりや測定誤差に関係性を持たせることに特徴がある。そしてパーティクルの広がりによってスポットライトの径を決定している。もしもパーティクルから測定誤差が推定できない場合には、捜し物にスポットライトを確実に当てるためには、精度の悪い機器に合わせてスポットライトの径を決定しなければならない。このような場合には、Type C1 の結果は C2 と同じようになり、また、Type A, B についても本システムの優位性が損なわれることは容易に想像できる。

5.4.2 ユーザの動作について

すべてのユーザが、次のような動作で捜し物をしていった。提案システムでは、コントローラのボタンを押してから、ムービングライトが動いている間は、足を止めてスポットライトの動きを見ている。この間の時間は、捜し物の位置によって異なるが、多くても数秒である。スポットライトが止まってからユーザは動き出して、スポットライトの中を捜していた。ワイヤレスロケータの場合には、音がはっきりと聞こえるときには、被験者がコントローラのボタンを押した直後から歩き出していた。タグが何かの下に隠しっていて音が小さくなると、被験者によっては、動き出すまでに時間がかかったり、タグを隠している場所とは違う方向に歩き出したりすることもあった。

光による位置の通知は、システムが位置を誤認していなければ、1 歩目に捜し物の方向に確実に歩き出すことが特徴であるといえる。一方、音の良いところは、1 歩目に間違った方向に歩き出したとしても、自らが動くことにより生じる音の変化を感知して、その間違いに気づくこともできることである。

5.4.3 システムが位置を誤認しているとき

提案システムの Type C3 は、恣意的に位置の誤認をさせた状態で捜し物を行った場合である。スポットライトが 10 秒間灯火してから消灯したときに、ほとんどの被験者は再度コントローラのボタンを押して、パーティクルの初期化処理が実行されていた。初期化処理から、次に位置計測器からの計測情報が得られるまでは、実験空間内にランダムに配置されたパーティ

クルの平均値である部屋の中心に、巨大なスポットライトが照射されている。この間の時間は、長くても Active RFID の更新間隔である 7 秒である。このときには、被験者は疑心暗鬼な様子で部屋の中心付近を捜すか、手を止めて考え込んでいる被験者もいた。位置情報が得られると、その位置にスポットライトが適切な大きさで照射される。被験者はそれを見て動き出し、タグを見つけていた。

このような Type C3 は、想定している移動の速さを超えて、捜し物が実際に移動した場合に発生する。この想定している移動量は、パーティクルフィルタによって設定する。そして、その設定は、Type C1 と C3 の状態が継続する時間に影響を与える。頻繁に移動すると設定すれば、提案システムの長所である C1 の状態である時間は短くなり、同時に、短所である C3 である時間も短くなる。逆に、あまり移動しないと設定すると、C1 の時間が長くなるが、C3 の状態も長くなってしまう。このようにこの 2 つの状態は、トレードオフの関係にある。このようなパーティクルフィルタの設定は、捜し物が頻繁に動くものであるのかどうかによって適切に設定することにより、提案システムを有効に利用することができると考えている。

5.4.4 スポットライトの視認性について

比較実験の間、被験者がスポットライトを見失っていたかを確認していた。今回の実験環境においては、スポットライトの光を見失うことは一度もなかった。そしてこの理由には、スポットライトの光の強さだけが関係しているわけではないことが分かった。それは次のようなユーザの行動から推測される。ムービングライトは、被験者からの指示を受けてから、スポットライトを灯火してパンとチルトを動かして捜し物の位置までスポットライトを移動させる。この間、被験者によっては、移動するスポットライトではなく、ムービングライト機器本体を見る人がいた。ムービングライトは、その形状から、どこに光を照射しているのかを、たとえ実際に光を照射していなくてもある程度推測することができる。よってムービングライト機器本体が、スポットライトがどこに照射されているかを認識するための手助けになっていたと考えられる。光の強さだけでなくこのような要因もあり、今回の実験においては、スポットライトを見失う被験者はいなかった。

また、認識を高めるためにスポットライトの光を強めると、直接目に当てて眩しさを感じてしまう、という問題がある。今回の実験では、ムービングライトを実験環境の高い位置（高さ約 1,200 mm）に設置して、

下向きに光が照射するようにしていた。この対策により、今回の実験中では、スポットライトを眩しいという被験者はいなかった。

6. おわりに

本論文では、共用性、透過性があり、即時性に優れた捜し物発見支援システムについて述べた。システムは、2種類の位置計測機をパーティクルフィルタによって融合することにより、状況によっては精度の高い透過的な位置計測を実現する。また、スポットライトを捜し物に照射することによって、すぐに捜し物を見つけ出すことを可能とする。評価実験では、ともに共用性、透過性、即時性がある音による捜し物発見システム（ワイヤレスロケータ）との比較実験を行った。実験結果から、提案するシステムが即時性において優れているところは、捜し物の全体や一部が見えているとき、または、捜し物が隠れた状態になってからある一定の時間の間であることが明らかとなった。ある一定の時間とは、システムのパーティクルフィルタの設定によって決まる。

現時点で明らかとなっている課題は、システムを構築するためのコストが高いことである。提案システムは、超音波方式の位置計測器、Active RFID、そしてムービングライトを探索領域に配置しなければならない。また、捜し物に付けるタグの大きさも課題である。タグは、できるだけ小型で電池寿命が長い方がよい。今後は、より低コストで容易に構築、利用できる捜し物発見支援システムについて研究してゆきたい。

謝辞 評価実験に協力していただいた被験者の方々に感謝いたします。また、本研究の一部は文部科学省知的クラスター創成事業石川ハイテク・センシング・クラスターにおける「アウェアホーム実現のためのアウェア技術の開発研究」プロジェクトの一環として行われました。

参 考 文 献

- 1) 渡辺伸吾, 西山 智, 服部 元, 小野智弘, 越塚登, 坂村 健: コピキタス環境のための非接触ICカードを使用した位置検出方式, 情報処理学会研究報告 2003-UBI-1, pp.73-78 (2003).
- 2) 中田豊久, 金井秀明, 國藤 進: スポットライトによる物探し支援システム, 情報処理学会第55回グループウェアとネットワークサービス研究会 (No.2004-GN-055) (2005).
- 3) Nakada, T., Kanai, H. and Kunifuji, S.: A Support System for Finding Lost Objects using Spotlight, 7th International Conference on Hu-

- man Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI), pp.321-322 (2005).
- 4) Shinnishi, M., Iga, S., Higuchi, F. and Yasumura, M.: Hide and Seek: Physical Real Artifacts which Responds to the User, World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'99/ISAS'99), Vol.4, pp.84-88 (1999).
- 5) Butz, A., Schneider, M. and Spassova, M.: SearchLight - A Lightweight Search Function for Pervasive Environments, Proc. Pervasive Computing, pp.351-356 (2004).
- 6) Kato, H., Billingham, M., Poupyrev, I., Imamoto, K. and Tachibana, K.: Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, Proc. International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000), pp.111-119 (2000).
- 7) Reitmayr, G. and Schmalstieg, D.: Location based applications for mobile augmented reality, 4th Australasian User Interface Conference, pp.65-73 (2003).
- 8) Ma, H. and Paradiso, J.A.: The FindIT Flashlight: Responsive Tagging based on Optically Triggered microprocessor wakeup, Proc. UbiComp 2002 (2002).
- 9) Raskar, R., Beardsley, P.A., van Baar, J., Wang, Y., Dietz, P.H., Lee, J.C., Leigh, D. and Willwacher, T.: RFIG lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, Proc. SIGGRAPH 2004 (2004).
- 10) Nelson, R.C. and Green, I.A.: Tracking Objects using Recognition, International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02), August 2002, Vol.2, pp.1025-1039 (2002).
- 11) 上岡隆弘, 河村竜幸, 河野恭之, 木戸出正継: I'm Here!: 物探しを効率化するウェアラブルシステム, ヒューマンインタフェース学会, Vol.6, No.3 (2004).
- 12) 麻生英樹, 本村陽一, 吉村 隆, 山本 潔, 市村直幸, 原 功, 浅野 太: パーティクルフィルタを用いた複数話者の位置と発話状態の追跡, 2003年ベジアンネットワークセミナー (2003).
- 13) 樋口知之: 粒子フィルタ, 電子情報通信学会誌, Vol.88, No.12, pp.989-994 (2005).
- 14) Hightower, J., Brumitt, B. and Borriello, G.: The Location Stack: A Layered Model for Location in Ubiquitous Computing, 4th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems & Applications (WMCSA 2002), pp.22-28 (2002).
- 15) 小山慎哉, 葛岡英明, 山崎敬一, 山崎晶子, 加藤浩, 鈴木栄幸, 三樹弘之: 実空間上の遠隔作業指示を支援するシステムの開発, 情報処理学会論文

誌, Vol.40, No.11, pp.3812-3822 (1999).

- 16) Paul, R.P.: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control (Artificial Intelligence)*, The MIT Press (1981).
- 17) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, 2.4 逆運動学問題, コロナ社 (1988).

(平成 18 年 10 月 13 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



中田 豊久 (正会員)

1970 年生。2006 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士課程修了。博士 (知識科学)。同年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科研究員。実世界指向インタフェース, データマイニングに関する研究に従事。人工知能学会, 電子情報通信学会各会員。



金井 秀明 (正会員)

1969 年生。1996 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程単位取得退学。工学博士。同年同大学大学院情報システム学研究科助手。2000 年カナダ University of British Columbia 客員研究員, 2001 年オランダ Vrije Universiteit Amsterdam 研究員, 2003 年電気通信大学研究員。2004 年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター准教授, 現在に至る。デジタル図書館等の Web 情報資源に関する研究に従事。現在, Semantic Web 技術のユビキタス環境への応用に興味を持つ。IEEE-CS, ACM 各会員。



國藤 進 (正会員)

1947 年生。1974 年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年富士通 (株) 国際情報社会科学研究所入所。1982 ~ 1986 年 ICOT 出向。1992 年より北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授, 1998 年より知識科学研究科教授。博士 (工学)。情報処理学会創立 25 周年記念論文賞, 1996 年人工知能学会研究奨励賞各受賞。日本創造学会理事長。人工知能学会, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会等各会員。