

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無くすことがある。本論文では、このような屋内で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ところについて明らかとした。

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無くすことがある。このような探し物は、例えば、怪我をした時に薬が見つからない時や、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。

物を無くす原因には、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、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 直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 予め物に機器(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、我々は、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、インターフェースが重要になると見える。つまり、システムが既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。例えば、「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全て管理しなければいけないし、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・管理していくかなければいけない。一方、予め紛失する可能性のある物に小さな機器(タグ)を付け

† 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

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。携帯電話機を無くしたときに、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時には、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あ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あてるために、捜し物に予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だ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。

本論文は次の様に構成されている。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とする。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ところを示す。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、捜し物に予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と対応する電波が発信し、それを受けたタグが約70db

のピッピッ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(Grobal 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を灯火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、画像認識によって予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ステムの方が優れていることを5章の比較実験で示す。

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	探し物に付けるタグ	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	地図
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	検出可能範囲
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	検出器の周り
3. Hide and Seek ⁴⁾		× 2		× 6	検出器の周り
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	検出器の周り
7. FindIT ⁸⁾		× 3		× 6	検出器の周り
8. RFIG ⁹⁾		× 3		× 6	検出器の周り
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		検出器の周り

×₁: 「検出器の配置」が「人」でかつ「探し物に付けるタグ」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いけないため。

×₆: 「探し物に付けるタグ」が「あり」のため。

1: 電波が微弱なため、屋内や鞄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。

3. システム構成

ここでは、提案する探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予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 によって常に取得し続けている。ユーザが探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、探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、探し物を発見することができる。

探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。確率が高い時には、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探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。探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スポットライトを照射する。ユーザは手に持つ PDA

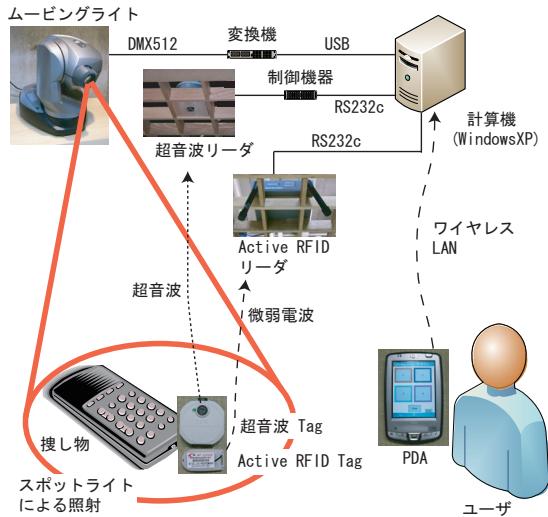


図 1 ハードウェア構成
Fig. 1 Hardwares of the system.

によって何を捜したいかをシステムに要求する。

Active RFID は、300MHz 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 60mm 程、リーダは約 120mm 程の大きさである。電波の届く距離は、我々の実験した環境においては、7~8m 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 250mm 程、リーダは約 80mm 程、タグは電池式の小型のもので約 40mm 程、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 90mm 程の大きさである。超音波の届く距離は約 7m 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出来る。その測定誤差は、約 50mm である。使用している超音波は、中心周波数 40KHz 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 秒毎に行われる。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ー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、透過性を保つつゝ、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、例えば 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のも特徴の 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ぬ場合、確実に探し物にスポットライトをあてるためには、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いけない。たとえ精度良く測定でき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いけないため、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時には小さな径でピンポイントで探し物の場所を示し、即時性を高めることが期待される。

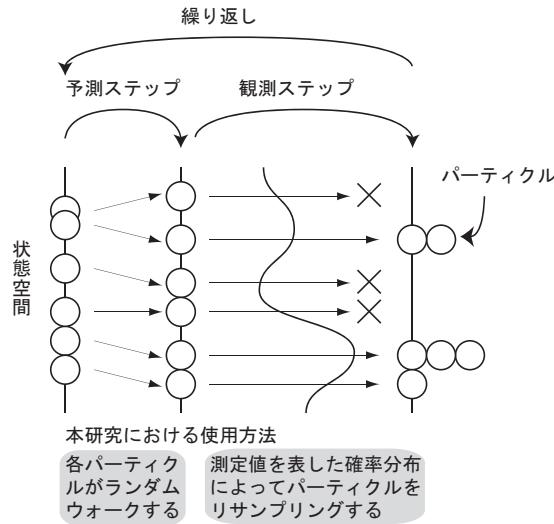


図 2 パーティクルフィルタ手法と本研究における使用方法
Fig. 2 An algorithm of particle filter and the usage of it in our study.

さらに、パーティクルフィルタの計算コストは低い¹²⁾。例えば、位置推定の計算に大きな時間がかかる場合には、すぐにユーザが探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が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、様々

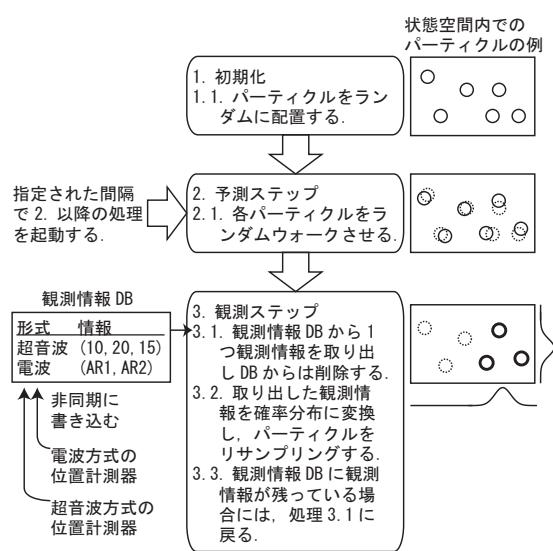


図 3 本研究におけるパーティクルフィルタの実装方法
Fig. 3 An implementation of particle filter on our research.

な分野で利用されている要因となっていると考えられる。例えば、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

前節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。

探し物はどのような移動をするのかを予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無い場合には、そこではなにも処理をしない。よって観測情報が無い場合には、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、徐々に探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、探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。例えば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。例えば、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。さまざまな種類のセンサー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時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とした確率分布として表し、パーティクルの広がりと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、次節以降で述べる。

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、移動する法則が予め分かっている場合には、その法則をランダムウォークを代わりに使用し、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、その位置に実際に探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、探し物がその位置にあると考えられる。このややこしい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。探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の仕方が異なる。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して定義して、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、受信を処理する時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50mm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い。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。

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

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わされる。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わされる。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。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。

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

x_d は、Active RFIDリーダの位置とパーティクル

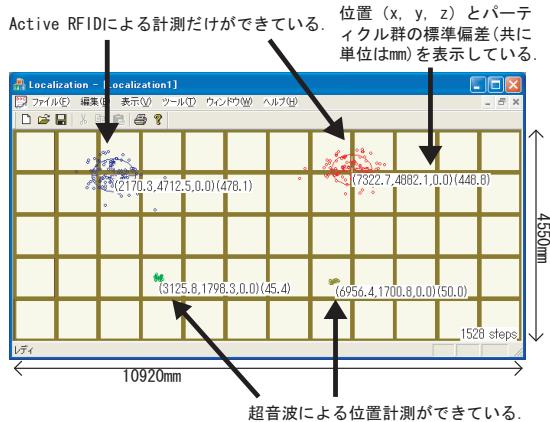


図 4 パーティクルフィルタの実行例
Fig. 4 An example of execution of particle filter.

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 リーダの周りにあるとなり、 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)にて実施した、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るもので、下 2 つは超音波による測位ができるものである。パーティクルの広がりを表すために、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。超音波による測位のできている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わかる。

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。例えば、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、様々なセンサー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は、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れる。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、Hightower ら¹⁴⁾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時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がある。パーティクルがランダムウォークで広がる早さは、捜し物がどれだけ移動しやすいかによって決められる。例えば、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様な方法で補おうとしている。ユーザが捜し物を要求した時には、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、次の観測情報に直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 回の捜し物検索の間で 1 回のみ実施されるようにしている。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、たとえばレーザポ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。例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。

次節以降では、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いけない。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。この時に、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探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軸周り

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探し物の位置を P_m 、位置計測器の座標系での同じ探し物の位置を 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、探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} を求めるべき。

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によって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、カメラ等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ーフェース

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ーフェースを構築している。PDAの画面には、探し物につ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あたる。

このような入力インターフェースは、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ー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、入力インターフェースについ



図 5 実験環境の様子
Fig. 5 The experimental environment.

ては比較対象としていない。被験者への探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ーフェースとしては、例えば、新西兰⁴⁾のように音声入力を用いた入力インター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 が紛失して探し物ができない、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、及び、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、環境内のどこに探し物があっても、透過的な位置計測が可能となるようになっている。また、どこであっても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、更新の早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 秒ごとした。また、ランダムウォークで移動する距離は、全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 1m 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 50mm であるため、観測位置を平均値とした標準偏差 50mm の正規分布として表した。Active RFID

Active RFID リーダ、超音波リーダは全て実験環境の天井（高さ 1970mm）に設置している。

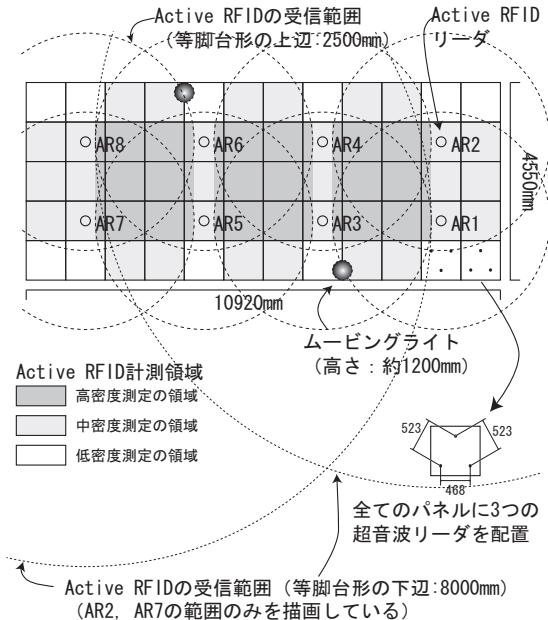


図 6 実験環境における機器の配置図
Fig. 6 Arrangement of devices in our experiment.

は、リーダの周りの半径 2500mm 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 8000mm 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 2500mm、下辺が 8000mm 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たら約 10 秒間、タグは音を鳴らし続ける。この仕様に合わせて、スポットライトが灯火している時間を 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灯火し続ける。10 秒後に消灯した時に、直ぐに再度要求を発行すると、3.3.7 節にて述べた、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 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 か所の場所に 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、正規分布であらわす場合

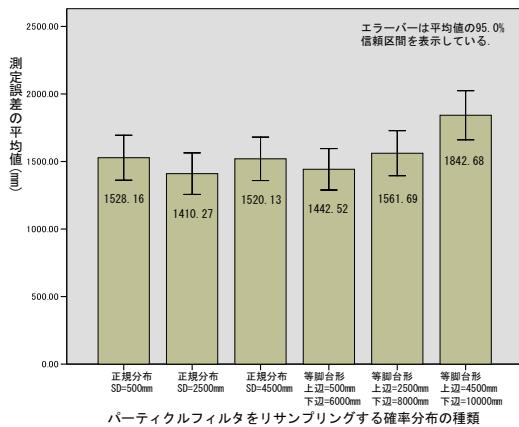


図 7 Active RFID の確率分布をさまざまに変えたときの位置精度について

Fig. 7 Measurement errors in several probability distributions

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と測定誤差との相関係数	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

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。但し、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。垂直方向の誤差も考慮する場合には、天井の高さである 1970mm を幅として持つ一様分布の標準偏差 568.7mm 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 4500mm 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

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	1374.5mm	648.4mm	37
中密度領域	1591.6mm	910.0mm	42
低密度領域	1808.1mm	925.1mm	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

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相関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が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を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と測定誤差に関係性があることがわかる。

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と測定誤差が関係性を持つことがわかった。

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 1300mm の誤差がでる。一方、超音波の場合、実験環境内のどこであっても誤差 50mm 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。ここで言う高精

度の場合とは、超音波式の位置計測器の仕様である約50mm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、タグとリーダー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5m先のところでも約0.719mm単位でスポットライトの位置を制御することができる。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6m先で約400ルクス、10m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6m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6m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、探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. 音による探し物発見支援との比較実験

ここでは、音を利用した探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とする。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、即時性を実現する探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



図8 実験で捜したタグ。左が音による探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

違点は、探し物の位置を「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一の目的である。即時性を調査する尺度としては、探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、隠れた位置にある探し物も対象として評価する。

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、予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う。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つ

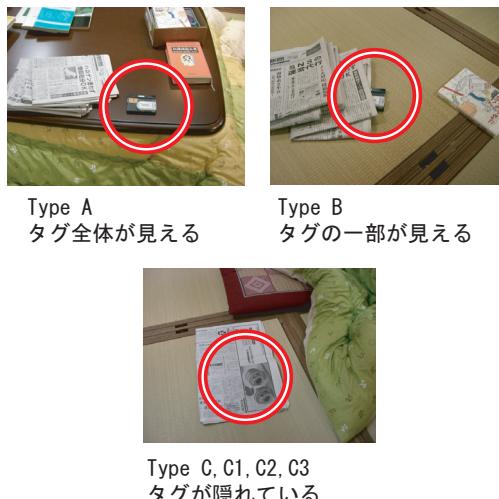


図 9 隠し場所の種類の例

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.

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、この時にシステムがどの様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。共に、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にスポットライトを照射し、場合によっては 3.3.7 節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える。しかし被験者に対しては、位置を誤認す

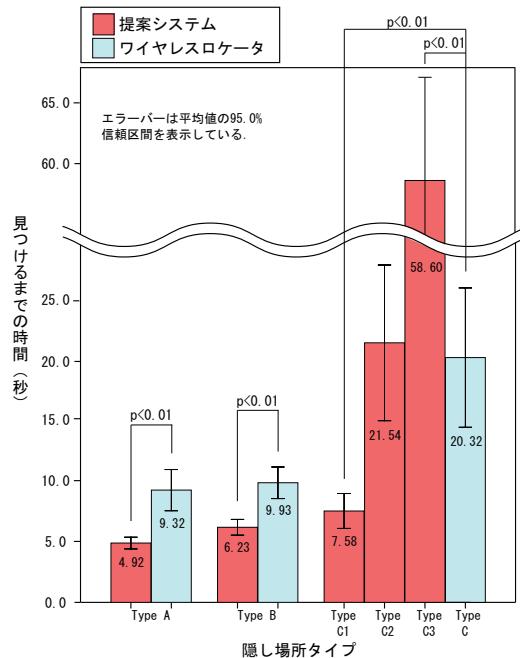


Fig. 11 Times for finding the object in types of the location which tags are.

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

全ての被験者の全ての実験において、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、両システムが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つた。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探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 のみの位置計測の時 (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探し物があり、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、探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と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従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、探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いけない。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

全てのユーザが、次の様な動作で探し物をしていた。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、探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すこともあった。

光による位置の通知は、システムが位置を誤認しないければ、一步目に探し物の方向に確実に歩き出すことが特徴であると言える。一方、音の良いところは、一步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探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、殆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。この時には、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早さを超えて、探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、探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ないかを確認していた。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。この理由は、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事が分かった。それは次の様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チルトを動かして探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いこと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、直接目にあ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1200mm）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言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って、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、直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、共に共用性、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事が明らかとなった。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いけない。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良い。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行きたい。

謝辞 評価実験に協力して頂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: ユビ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) T. Nakada, H. Kanai, S. Kunifugi: A Support System for Finding Lost Objects using Spotlight, 7th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI), pp.321-322, 2005.
- 4) M. Shinnishi, S. Iga, F. Higuchi and M. Yasumura: 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) A. Butz, M. Schneider and M. Spassova: SearchLight - A Lightweight Search Function for Pervasive Environments, Pervasive Computing Proceedings, pp.351-356, 2004.
- 6) Kato, H., Billinghurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K., Tachibana, K.: Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, In proceedings of the International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000), pp.111-119, 2000.
- 7) G. Reitmayer and D. Schmalstieg: Location based applications for mobile augmented reality, 4th Australasian User Interface Conference, pp.65-73, 2003.
- 8) H. Ma, J. A. Paradiso: The FindIT Flashlight: Responsive Tagging based on Optically Triggered microprocessor wakeup, Proceedings of UbiComp 2002, 2002.
- 9) Ramesh Raskar, Paul A. Beardsley, Jeroen van Baar, Yao Wang, Paul H. Dietz, Johnny C. Lee, Darren Leigh, Thomas Willwacher: RFIG lamps: interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, Proceedings of SIGGRAPH 2004, 2004.
- 10) Randal C. Nelson, Isaac A. Green: Tracking Objects using Recognition. International Conference on Pattern Recognition (ICPR02), August 2002, Volume 2, 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 年ペイ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) Jeffrey Hightower, Barry Brumitt and Gae-tano Borriello: 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) Richard P. Paul: 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 4 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

インターフェース, 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. 情報処理学会, 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.