

移動機器連携ロケーショントラッキング方式の提案

峰野 博史 肥田 一生 水谷 美穂

宮内 直人[†] 楠 和浩[‡] 水野 忠則

静岡大学情報学部 [†] 三菱電機情報技術総合研究所

[‡] 三菱電機名古屋製作所

概要 ロケーショントラッキングはユビキタスコンピューティングを支えるための基礎技術としても重要である。しかし屋内環境では、位置検出可能範囲が専用設備の整備された範囲に限定され、その整備にコストと労力を要したり位置検出対象物に専用デバイスが必要であるといった理由から広く普及しているものはない。本研究では、実用的個人ユース向けロケーショントラッキングシステムの構築を目指し、トラッキング対象物に高価な専用デバイスを必要とせず安価にトラッキング可能範囲を拡張できる移動機器連携ロケーショントラッキング方式を提案する。本方式では、無線 IC タグ等の添付された識別可能な対象物を位置検出可能な移動機器群の検知履歴を利用してトラッキングするという特徴を持ち、本方式に適する位置検出方法や位置推定方法について検討する。

A Proposal of a Location Tracking Method in Cooperation with Mobile Detectors

Hiroshi Mineno Kazuo Hida Miho Mizutani

Naoto Miyauchi[†] Kazuhiro Kusunoki[‡] Tadanori Mizuno

Faculty of Information, Shizuoka University

[†]Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

[‡]Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corporation

Abstract There is increasing interest in accurate location tracking techniques and it is especially important to provide ubiquitous computing environment for indoor areas. Although there are many techniques, the resolution of tracking depends on a grid of ceiling sensors with fixed locations and the object that is tracking must support a special device such as wireless LAN. In this paper, we present a new location tracking method with using mobile detectors' tracking record. The feature of this method are easy for expanding the tracking areas and the tracking object need not support a rich device. We also describe the suited location sensing techniques of mobile detectors and how to track the objects by analyzing the record.

1 はじめに

ユビキタスコンピューティングのコンセプトが提唱されて以来、今なおその実現に向け様々な試みがなされ続けている。多数の情報機器、センサを意識せずその恩恵を享受し、空間的・地理的制約、通信対象・能力制約からの解放が進むにつれ、情報が水や電気、交通と同様な当たり前の生活要素になりつつある。このような環境では、情報源の遍在性のみならず、人や物の動きをセンシングし、得られた情報を解釈してフィードバックする技術も重要となる。特に、ユーザを含め、周囲に散在する多様な機能、属性を持つ物理オブジェクトに関する位置情報は、コンテキストウェアなサービスを提供するた

めの基礎情報となる場合が多い [1, 2]。

位置情報を取得するための位置検出技術には様々なものがあるが、現状では人工衛星を利用した GPS の利用が一般的である。ただし GPS は、ビル内部など GPS 衛星からの電波が受信できない環境ではほとんど利用できない。そのため、屋内における位置情報の取得には、光や音、無線技術などを利用した様々なシステムが開発されている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]。どのシステムも様々な特徴を持っているが、最も重要なポイントは、想定アプリケーションが必要とする位置推定精度や対象物に必要なデバイス、環境整備に必要なコスト等のバランスを考慮してシステムを構築することである。

本稿では、屋内環境において「今現在、どこに、

何が、どのような状態で存在しているか」を把握可能なロケーショントラッキングシステムの構築を目指し、トラッキング対象物に高価な専用デバイスを必要とせず、安価にトラッキング可能範囲を拡張できる移動機器連携ロケーショントラッキング方式を提案する。以下、第2章で屋内向け位置推定技術の現状について分析し、第3章で提案方式の特徴と本方式を実現する上で重要となる項目について検討する。最後に、第4章でまとめと今後の課題について述べる。

2 位置推定技術の課題

人や物の現在位置の追跡を目的とするロケーショントラッキングシステムは、家庭や社内において共同利用する物品の管理、人や動物の保護などを目的とする個人ユースから、サービスマンやタクシーの効率的派遣、商品の輸送管理などを目的とする法人ユースまで様々な用途で注目されている。その要求される位置検出精度は、屋外では数 m ~ 数十 m であるのに対し、屋内では数十 cm ~ 数 m 程度が必要だといえる。これは、屋外で有意な地理情報は建物単位であることが多く、屋内では建物内の構造に依存することが多いためである。

屋内環境で数 cm ~ 数十 cm 程度の位置推定精度を得るためには、[1, 5] のように位置検出装置を環境に高密度に設置する方法がある。しかしこの方法では、環境構築のために必要な設置や設定にコストと労力がかかるという課題がある。また、位置推定精度は 2, 3m 程度になるが、[4, 6, 7] のように比較的遠くまで通信可能な無線 LAN や電池を内蔵し自ら電波を遠くまで発信可能なアクティブタグを利用することで、高密度に専用設備を設置する労力を抑えようという方法もある。しかし、この方法では位置検出対象物に無線 LAN やアクティブタグのようなリッチな専用デバイスが必要であるといった制約がある。

このような理由から「今現在、どこに、何が、どのような状態で存在しているか」を簡単に把握可能なシステムでさえ実現されておらず、広く普及した実用的個人ユース向けロケーショントラッキング方式というものは無いのが現状である。

3 移動機器連携ロケーショントラッキング方式

本稿で提案する移動機器連携ロケーショントラッキング方式は、トラッキング対象物の位置検出を直接高精度に行うのではなく、位置検出可能な移動機

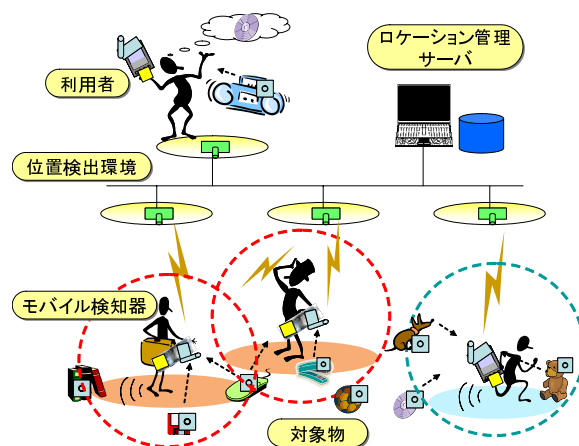


図 1: 移動機器連携ロケーショントラッキング方式

器を利用することで間接的に対象物をトラッキングする。これにより、トラッキング対象物へ高精度な位置検出用デバイスを装備する必要をなくしトラッキング対象物の制限を緩和する。また、複数の位置検出可能な機器が移動し、各移動機器が検知した情報と蓄積された検知履歴を利用することで、専用設備の設置や設定のチューニングに必要なコストと労力を下げつつ位置推定精度を維持もしくは向上させることを目指す。

本方式を利用したロケーションシステムの構成を図 1 に示す。本方式は、識別可能な ID の取り付けられたトラッキング対象物、トラッキング対象物を検知可能なモバイル検知器、モバイル検知器の位置を検出可能な位置検出環境、モバイル検知器からのトラッキング対象物検知情報の管理と位置検出環境から得られた情報を使ってより高精度な位置を推定しロケーションサービスを提供するロケーション管理サーバ、ロケーション管理サーバの提供するサービスを利用する利用者から構成される。

本方式の特徴であるトラッキング対象物の制約の緩和と、専用設備の設置や設定に必要なコストと労力を抑えるために重要となるのは (1) 様々な大きさや特徴を持ったトラッキング対象物の高い検知率、(2) 低コストでスケラビリティのあるモバイル検知器の位置検出環境の構築 (3) ロケーション管理サーバでのトラッキング対象物の高精度な位置推定である。以下、各項目について詳細を検討する。

3.1 トラッキング対象物の検知方法

モバイル検知器は、静止あるいは移動中に検知した対象物の検知情報をロケーション管理サーバへ送信する。そのため、対象物検知用デバイスと検知情報送信信用デバイスの 2 つを持つ装置、もしくは 1 つのデバイスで両機能を実現できる装置を想定して

表 1: パッシブタグの特徴

| 交信周波数 | 通信方式 | 最大交信距離 | 指向性 | 耐水性 | 耐金属 | ノイズ量 |
|--------------------|-------|--------|-----|-----|-----|------|
| ~ 135kHz (長波) | 電磁誘導 | ~ 10cm | 中 | | | 小 |
| 13.56MHz (短波) | 電磁誘導 | ~ 30cm | 中 | | | 中 |
| 860 ~ 930MHz (UHF) | 電磁波伝搬 | ~ 3m | 大 | | | 中 |
| 2.45GHz (マイクロ波) | 電磁波伝搬 | ~ 1.5m | 大 | × | × | 大 |

表 2: 位置検知装置の特徴

| 検知方法 | 検知装置 | 伝搬媒体の影響 | 障害物の影響 |
|------|----------------------|---------|--------|
| 音 | 超音波センサなど | 大 | 小 |
| 光 | 光電センサなど | 小 | 大 |
| 電波 | 無線 LAN, Bluetooth など | 小 | 小 |

いる。昨今の無線通信デバイスの小型化と省電力化により、CF タイプの無線 LAN カードや低消費電力の ZigBee の開発も見込まれ様々な選択肢がある。本研究では、対象物を識別可能な ID として RFID (Radio Frequency Identification) システムで利用される無線 IC タグのような小型、低価格な機器を利用することで、対象物に必要なデバイスを単純なものとしてトラッキング対象物の制限の緩和を実現する。無線 IC タグには様々なものが開発されているが、表 1 に電池を内蔵しないパッシブタグの特徴を交信周波数で分類したものを示す。電磁波伝搬方式を用いるパッシブタグでは、無線 IC タグ自身が電波を電流に変換する専用回路を持ち、受信したタグリーダ/ライタからの電磁波エネルギーをそのまま電流に変えるため電磁誘導方式より最大交信距離が広い。電池を内蔵することで自ら電波を遠くまで発信可能なアクティブタグや水や金属に強いものと組み合わせることで、より多くのものをトラッキング対象物とすることができる。

ただし、無線 IC タグは必ずしも常にタグリーダに検知されるとは限らず、無線 IC タグとタグリーダの状態によって交信距離が変化する。例えば、無線 IC タグのアンテナ長が短かったりタグリーダの発する電波が弱いと交信距離は短くなる。無線 IC タグ内の IC チップの消費電力が大きな場合も交信距離が短い。また、タグリーダの電波伝搬範囲には指向性があり、伝搬範囲内に無線 IC タグがなければ交信できないだけでなく無線 IC タグの返す電波もタグリーダのアンテナ検知可能範囲になければ交信できない。つまり、タグリーダと無線 IC タグのアンテナの極性や傾きによって交信できないこともある。

以上のような特徴を持つ無線 IC タグとタグリーダであるが、移動する無線 IC タグを固定タグリーダで検知する代わりに、タグリーダを移動させることで様々な角度で存在する無線 IC タグの検知率の向上を図ると共にトラッキング可能範囲のスケラビリティを実現する。無線 IC タグに比べ高価なタグリーダを複数設置するのはコストの点から現実的でなく、数台のタグリーダを移動させることでトラッキング可能範囲の拡張に必要なコストを抑えられる。ただし、タグリーダには最大交信距離と指向性があるため、検知位置周辺のどの辺りに対象物が存在するかを推定する方法も重要である。これに関しては 3.3 節で述べる。

3.2 モバイル検知器の位置検出環境

位置検出環境を構築するために利用される位置検知装置は、音、光、電波を利用するものに大別できるが、その特性上、物理空間内を自由に移動するモバイル検知器の位置を検出するには、伝搬媒体や障害物の影響を受けにくい電波を利用した位置検知装置が適している(表 2)。

環境構築に必要な専用設備の設置や設定のチューニングに必要なコストと労力を抑えつつモバイル検知器の位置を検出するためには、前述した [4, 6, 7] のように比較的遠くまで通信可能な無線 LAN や電池を内蔵し自ら電波を遠くまで発信可能なアクティブタグを利用して位置推定のための基準点の数を減らす方法がある。ただし、一般に電波を利用した通信では、障害物での反射や屈折により多数の伝搬路から受信点に電波が到来するマルチパスフェージングが発生するため、屋内での位置推定精度は、距離

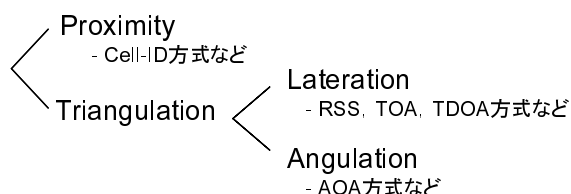


図 2: 位置推定方式の分類

が長いほど内部の構造や遮蔽物の影響を受けやすくなる。また、基地局から離れるほど伝搬損失の減衰量が小さくなるため、距離計算の誤差が大きくなり位置推定精度に大きな影響を与える。

ここでモバイル検知器の位置推定に利用可能な位置推定方式についてその特徴を分析する。位置推定方式は、位置検知装置の位置を対象物の位置に近似する Proximity、三角形の幾何学的な特性を利用して算出する Triangulation、さらに Triangulation は、位置検知装置との距離を利用して推定する Lateration と位置検知装置との角度や方位を利用する Angulation に分類できる (図 2)。

Proximity には、物理的な接触により近似する方式、対象物が受信した信号のうち最も電界強度の強い位置検知装置を選出し、その位置検知装置の近辺に存在すると判定する Cell-ID 方式などがある。これらの方式では、事前に位置検知装置の ID と位置を DB 化しておく必要がある。また、Cell-ID 方式の場合、精度は位置検知装置の信号到達可能範囲の大きさに依存するため、信号到達可能範囲が広すぎると推定される位置の誤差が増大する。

Lateration では、3 つ以上の同一直線上に存在しない位置検知装置との距離を測定し対象物の位置を推定する。位置検知装置との距離を測定する方法には、事前に測定し DB 化された受信信号の電界強度分布を利用した RSS (Received Signal Strength) 方式、信号の滞空時間から距離を算出する TOA (Time of Arrival) 方式、複数の位置検知装置間での信号受信時間差を利用した TDOA (Time Difference of Arrival) 方式などがある。電波を利用して距離を測定する場合、屋内のように多くの障害物が存在する環境では、反射や屈折によるマルチパスフェージングやシャドウイングにより電界強度が大きく影響を受ける。また、同種の電波を発生する機器でも採用チップや筐体形状などによって電界強度分布が異なるため、RSS 方式のような電界強度分布を利用した方式では、事前のキャリブレーションが非常に重要となる。一方、TOA 方式では、信号が発信されてから受信されるまでの滞空時間を利用するため、信号発信側と受信側間の正確な時刻同期が必要となる。TDOA 方式では、複数の位置検知装置間の信号

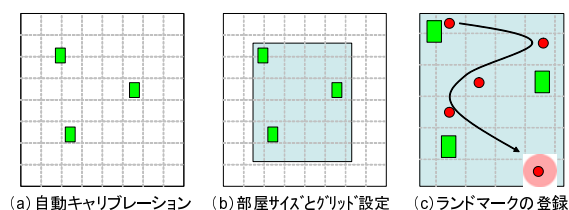


図 3: 位置検出環境の構築

受信時刻差を利用するため、複数の位置検知装置間の時刻同期のみでよい。また、信号受信時刻差の測定には、1 種類の信号のみを用いた方法と速度の異なる複数の信号を用いた方法がある。1 種類の信号のみを用いた場合は複数の位置検知装置間の時刻同期が必要となり、速度の異なる複数の信号を同時に発信する場合は 1 端末で全信号を受信可能であれば各信号の受信時刻差から距離を推定できる。このように、TOA 方式や TDOA 方式では正確な時刻同期と時間測定が位置推定精度に大きな影響を与える。

Angulation には、信号到来方位を利用した AOA (Angle of Arrival) 方式がある。AOA 方式では、2 つの位置検知装置間の距離と各位置検知装置への信号到来方向によって位置を推定する。信号到来方向の最も簡単な推定方法は、指向性アンテナを 360 度回転させて受信信号強度の強い方向を到来方向とする方法である。この方法は実現が容易であるが、角度の分解能がアンテナの指向性に依存するだけでなく物理的にアンテナを回転させる必要がある。そのため、アンテナ素子を複数配列したアレイアンテナを用いて各素子の受信信号の振幅や位相の違いから到来方向を推定する方法が注目されている。ただし、アレイアンテナを用いた方法は、角度の分解能がアレイアンテナの物理的な大きさやアンテナ素子数に依存したり、電波暗室のような環境でアレイ方向ベクトルの正確な測定が必要、全く同一の 2 つのサブアレイの作成とそれらサブアレイの特性が変化しないようなアンテナの相互結合が必要といった特徴を持ち、これらハードウェア的な要因が位置推定精度に大きな影響を与える。

いずれの方法にせよ、基準点となる位置検知装置の位置を事前に設定しておかなければならず、基準点の簡単な設定方法も望まれる。本方式では、物理空間上の正確な位置情報を設定するよりも、屋内のどこに基準点があるか、周辺にどんな物があるかという、より抽象化されたレベルでの位置情報が重要であることが多いことから、次のような位置検出環境構築方法を検討している。数個の位置検知装置を設置すると上記の推定方式を駆使して自動的にキャリブレーションが行われ、モバイル検知装置の設定画面に各位置検知装置の相対位置が表示される

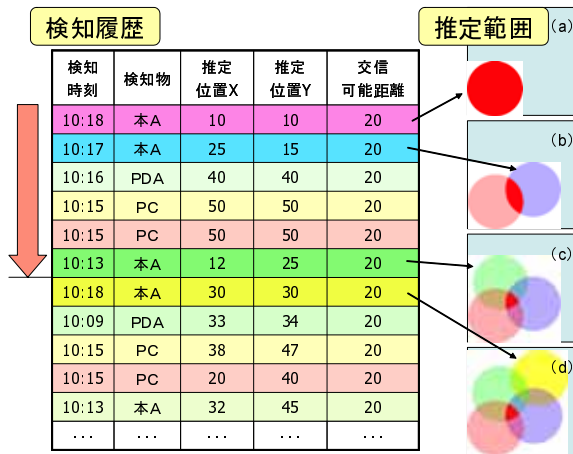


図 4: 検知履歴を利用した位置推定

(図 3(a)) . 設定者は各位置検知装置の相対位置から部屋の大きさとグリッドを設定する (図 3(b)) . その後、部屋を移動し検知された対象物の中からいくつか移動性の低そうな対象物の位置をランドマークとして登録する (図 3(c)) . これにより、各位置検知装置から得られた情報によって推定されたモバイル検知器の推定位置と設定者によって設定されたランドマークの位置がマッピングされ、推定位置と実際の位置のずれが補正できると考える . このようにして、環境構築に必要な基準点の設置と設定のチューニングに必要な労力を緩和させる .

3.3 トラッキング対象物の位置推定方法

ロケーション管理サーバは、モバイル検知器が検知した周囲にある無線 IC タグの検知情報を、検知時刻とモバイル検知器の位置、交信可能距離と共にタグ検知履歴としてデータベースで管理し、Web インタフェース等を通じてトラッキング対象物の位置情報やそれらの位置情報を利用したロケーションサービスを利用者へ提供する .

前述のようにタグリーダの無線 IC タグ検知範囲には指向性がある . しかしタグ検知方向まで管理するには高度な技術が必要となるため、単純にモバイル検知器を中心に最大交信距離を半径とした円をトラッキング対象物の存在する可能性のある範囲とする . モバイル検知器自身の位置が高精度に推定できてもモバイル検知器が検知したトラッキング対象物の位置はその周辺にあるとしかいえないため、トラッキング対象物の位置推定にはロケーション管理サーバで蓄積されたタグ検知履歴を利用する . 複数のモバイル検知器から得られたタグ検知履歴を新しいものから順に参照し、トラッキング対象物の移動がないと想定される履歴までを分析する . トラッキ

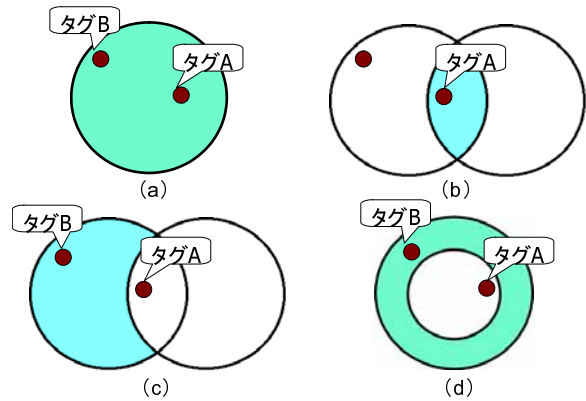


図 5: 検知履歴の分析方法

ング対象物の移動がないと判断できるのは、存在可能範囲として推定された範囲から外れた検知履歴が最初に現れた時である . この様子を図 4 に示す .

この例では、検知履歴の論理積範囲のみでトラッキング対象物の位置推定を行っているが、検知履歴の分析法として以下の 4 つが考えられる . ここでいう同時刻とは、トラッキング対象物の移動がないと想定されあらかじめ設定したある期間内のこととする .

1. トラッキング対象物 (タグ A、タグ B) の検知履歴が一つしかない場合、最大交信距離を半径とした円内に存在する (図 5(a))
2. 複数検知履歴に同じトラッキング対象物 (タグ A) が現れた場合、重なった範囲内に存在する (図 5(b))
3. 同時刻に検知された検知範囲の重なった複数の検知履歴において、同一のトラッキング対象物 (タグ A) とは別に、ある検知履歴には現れるが別の検知履歴には現れないトラッキング対象物 (タグ B) がある場合、そのトラッキング対象物 (タグ B) は検知範囲の重なっていない部分に存在する (図 5(c))
4. モバイル検知器の最大交信距離が制御可能な場合、最大交信距離をトラッキング対象物が検知されなくなるまで小さくしていくことで、検知され続けるトラッキング対象物 (タグ A) はより小さくなった円内に存在し、検知されなくなったトラッキング対象物 (タグ B) はドーナツ型の範囲に存在する (図 5(d))

以上のように複数の検知履歴を分析することでトラッキング対象物の存在する可能性の高い範囲を推定するが、ロケーション管理サーバで蓄積される検知履歴を常に全て分析するのは現実的でない . トラッキング対象物が移動していないと判断される検知履歴だけでも膨大な数になる可能性もある . そこ

で、トラッキング対象物の存在する範囲の面積を S 、モバイル検知器の最大交信距離を r とし、モバイル検知器から送信されロケーション管理サーバに蓄積された検知履歴中に目的のトラッキング対象物の検知情報が入っている確率を求めることで、トラッキング範囲の大きさと目標の検知率を達成するために最低限必要な分析すべき検知履歴数を調べる。

モバイル検知器の検知可能範囲内にトラッキング対象物が入らない確率は、 $1 - \pi r^2 / S$ である。モバイル検知器がランダムに移動しランダムな周期で検知情報をロケーション管理サーバへ送信し、ロケーション管理サーバ上には n 個の検知履歴が蓄積されていると仮定する。その n 個の検知履歴中において目的とするトラッキング対象物の検知情報が最低一つは存在する確率 P は、 n 回の試行で一度もトラッキング対象物の検知情報が現れない確率から以下のように表せる。

$$P = 1 - \left(1 - \frac{\pi r^2}{S}\right)^n \quad (1)$$

式 (1) において、モバイル検知器の最大交信距離 r を 0.5m とした時に、小数点以下第 3 位を四捨五入して $P \geq 70\%$, 80% , 90% , 100% となるために必要な履歴数を図 6 に示す。この図に示すように検知率 100% を得るために必要な履歴数が最悪値であり、モバイル検知器がトラッキング範囲全体をカバーするのに必要となる履歴数となる。モバイル検知器がトラッキング範囲内をランダムに移動しランダムに検知情報を送信するという理想的な環境では、必要な対象物の検知率を得るために、トラッキング範囲の広さに応じてどれだけの検知履歴を最低分析しなければならないかを把握できる。実際にはトラッキングすべき対象物の数とその分散性に依存するため、必要となる履歴数は少なくなると考えられる。

またモバイル検知器の移動は実際には完全なランダムでないと考えられるため、モバイル検知器の移動モデルや移動速度、検知情報の送信間隔、台数等のパラメータを変化させたシミュレーションや実際に試験環境を構築し検証してみる必要がある。

4 まとめ

本稿では、トラッキング対象物に高価な専用デバイスを必要とせず、安価にトラッキング可能範囲を拡張できる移動機器連携ロケーショントラッキング方式を提案し、本方式を実現する上で重要となる項目について検討した。

今後、モバイル検知器の移動モデルや移動速度、検知情報の送信間隔、台数、最大交信距離、対象物の数、対象物の移動性、トラッキング範囲等のパラ

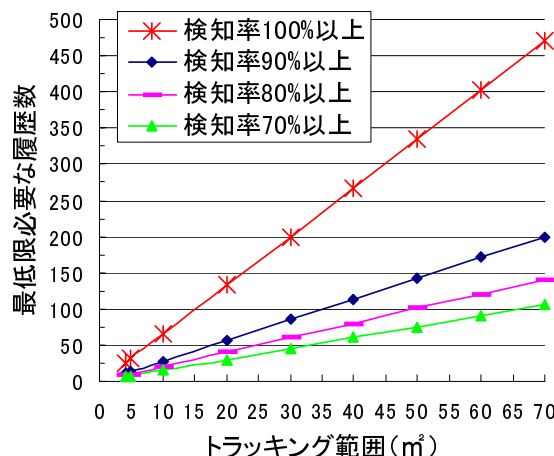


図 6: トラッキング範囲と分析すべき検知履歴数

メータを変化させ、トラッキング対象物の検知率や検知時間、履歴数、推定面積、消費電力等に関する基本特性を評価する。また、タグリーダの検知範囲の指向性と検知率の測定、モバイル検知器の位置検出環境の構築と位置推定方式の実装、検知履歴からのトラッキング対象物の位置推定精度の検証等、実際に試験環境の構築と試験運用を行い本方式の実現性と有効性を評価する。

参考文献

- [1] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward and P. Webster, "The Anatomy of a Context-Aware Application," *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 8, pp. 50–56, 2001.
- [2] J. Hightower and G. Borriella, "Location Systems for Ubiquitous Computing," *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 8, pp. 57–66, 2001.
- [3] R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, "The Active Badge Location System," *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 40, No. 1, pp. 91–102, 1992.
- [4] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System," *INFOCOM 2000*, pp. 775–784, 2000.
- [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, Vol. 00-HI-88, pp. 45–50, 2000.
- [6] 萩野敦, 恒原克彦, 渡辺昇司, 藤嶋堅三郎, 山崎良太, 鈴木秀哉, 加藤猛, "無線 LAN 統合アクセスシステム - 位置検出方式の検討 -," *DI-COMO2003*, pp. 569–572, 2003.
- [7] 椿俊光, 林等, 清水雅史, "無線タグを利用したトラッキングシステム," 電子情報通信学会全国大会, Vol. B-15-11, 2003.