迷子探しを目的とした屋内位置情報サービスの構築

Construction of Indoor Location based Service For Searching Lost Child

木村 峻介† 松本 卓人† 浜中 雅俊† 李 昇姫‡
Shunsuke Kimura Takuto Matsumoto Masatoshi Hamanaka Lee SeungHee

1. はじめに

我々は，ショッピングモールのような大型施設で迷子を防止したり，親が迷子を捜すのを支援する屋内位置情報サービスの実現を目指している．この屋内位置情報サービスでは，位置検出用デバイスを携帯した子どももしくは親が施設内のどのエリアにいるか Web ページで確認することを可能とする．

このような迷子探しを目的とした，位置情報サービスを構築する際に，我々は以下の点が重要であると考えている．

第一に，迷子を見つける時間が短縮されると共に，迷子の防止に役立つことである．具体的には，保護者が携帯電話等を用いていつでも Web ページ上から子どもの位置を確認できたり，子どもが親から離れた際に親の携帯電話の着信音が鳴るような Web サービスを実現する．このサービスを利用すれば，迷子が現在いるエリアが分かるため捜索範囲が狭まり，捜索時間の短縮が期待できる． また，親子のいるエリアが一定以上離れた時，親に連絡することで迷子の予防の効果も期待できる．

第二に，屋内位置情報サービスの普及のためには，既存の施設への導入が容易であることが重要である．具体的には，導入にあたって必要となる作業を減らし，コストを抑える必要がある．位置を常時推定する手法の一つである無線電波通信を用いた手法では，位置を推定する範囲の中に，位置の基準点となる基地局を複数設置する必要があるため，導入コストは基地局の設置個数が多くなるほど高くなる．そこで我々は，基地局の設置個数を削減する位置推定方式を提案する．

第三に，階が異なるエリアへの誤推定は迷子の捜索を困難にするため，階を正しく推定することが重要である．特に，木造や吹き抜けのある建物では，電波が階を跨いで届くことがあるため階の推定を誤る可能性がある．そこで我々は大気圧センサを用いて高度を測定することで，階誤りを防ぐことを試みた．大気圧センサを用いると別の階から到達する電波を利用して位置推定の精度を向上させたり，基地局の数を削減することが可能となる．そこで我々は実験により，基地局を設置していない階での位置推定が可能であるか試みた．

第四に，エリアを間違えたとしても遠く離れたエリアではなくせいぜい隣接したエリアとなることが重要である．屋内での電波環境は壁や物や人との反射，シャドウイング，マルチパス等の影響で，非常に複雑なため，位置推定は容易でなく，誤って推定する可能性がある．その場合でも隣接したエリアであると推定されていれば，迷子の発見に寄与できよう．そのため我々は屋内の電波環境と屋内での人の移動を確率モデルで表すことで，過去の位置の履歴を反映させた位置推定を行う．これにより，大きな推定誤りを抑えることが可能になる．

本稿では，これらの位置推定手法の提案と実装方法および評価実験について述べる．実際の大型ショッピングモールにおける自由歩行の位置推定実験を行った結果，従来手法に比べ約 30%正解率が向上し，また基地局を設置していない階での位置推定が可能であることを確認した．

以下 2 章では，迷子探しを目的とした屋内位置情報サービスの概要について述べ，3 章では関連する研究について議論する．そして 4 章では，屋内位置推定方式について提案を行い，5 章でその具体的な方法として，確率モデルを用いた位置推定手法について述べる．さらに，6 章で実装について説明し，7 章で評価実験について述べる．最後に 8 章でまとめる．

2. 迷子探しを目的とした位置情報サービス

我々は，つくば市内の大型ショッピングモール（イーアスつくば）にて，迷子探しと迷子防止を行うための位置情報サービスの構築を行っている．具体的には，提供するサービスと，それに対応するシステムを循環的に検討，開発してきた．

2. 1 提供するサービス

子どもが迷子になり，長時間保護されないことで危険にさらされる事態を防ぐために以下のサービスを提供する．

- デバイスの貸し出し: ショッピングモールのインフォメーションカウンターでサービスの利用登録をすると， 親子に一組のデバイスが貸し出される．このデバイスを親子がそれぞれ所持することで位置情報サービスが利用可能となる． 貸出時には，デバイスに対応した Web ページにアクセスするためのパスワードが発行される．
- Web 上での位置情報確認 ： 携帯電話などからパスワード付きの専用 Web ページへアクセスし，自分と子どもがいると推定される各エリア(半径 20～30m)をリアルタイムで確認できる．位置情報は Web ページの地図画像上に表示され， 親と子どもの位置情報が同時に提示されるため，親は子どもの位置を容易に把握することが可能である．
- 迷子の防止 ： 親と子どものいるエリアが一致も隣接もしていない場合， 親と子どもが離れたとして，登録したアドレスにメールを出し着信音を鳴らす．
- 施設従業員による捜索 ： 親が Web ページ上の緊急呼び出しボタンを選択することで施設従業員が協力して迷子捜索を行う．子どもを発見した場合

† 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
‡ 筑波大学大学院人間総合科学研究科

はシステムから直ちに連絡が入る．

2．2　システムの構成

上記のサービスを実現するために以下の要素からなるシステムを構築した．

- デバイス：子どもが施設内で常に身に着けていても気にならないような軽量かつ動きやすいウェアラブルデバイスであり親も同じデバイスを所有する．一定間隔で固有 ID を発信する．
- 情報管理サーバ：デバイスの固有 ID や位置情報，時間情報などをデータベースに登録，管理する計算機.
- 基地局：位置推定対象範囲の各地に設置する無線通信機器の基地局．デバイスからの信号を受け取り，位置情報を付加して情報管理サーバに送信する．
- Web サーバ：情報管理サーバの情報をもとに子どもと親の位置を Web ページ上に表示する．表示方法には地図画像表示とテキスト表示がある．

3．関連研究

一般的に位置情報は，GPS（Global Positioning System）を利用することで取得可能である．しかし，屋内では GPS の電波が弱くなるため測位が困難である．そのため，無線 LAN，RFID，IMES，XBee，赤外線などの無線通信を用いた位置推定手法の研究が進められている[3]-[8]．赤外線などの光を用いた無線通信は，太陽光のノイズに弱いという問題や，物影に隠れると光が届かず通信が困難であるという問題がある．また，太陽光を取り入れる吹き抜けがある施設では利用することができない．RFID は通信距離が数センチから数メートルと短いため，大型施設内で常に位置を推定しようとすると，基地局の設置コストが増大し，現実的でない．

そのため，我々は屋内でも 30m 以上の通信距離があり，なおかつ小型で，軽量という特徴のある無線電波通信機器 XBee[1]を利用する．子どもが携帯するデバイスを構築する上で，小型で軽量，省電力という特徴は非常に重要である．

電波を用いる通信機器の屋内での位置推定手法は，一般に 3 種類の方式がある．一つ目が RSSI（Received Signal Strength Indicator）方式[3][13]-[17]であり，二つ目が TDOA（Time Difference of Arrival）方式[10]であり，三つ目が AOA(Angle of Arrival)方式[18]である．RSSI 方式は，基地局と通信機器との電波強度から位置を推定する方式である．一方，TDOA 方式は基地局と通信機器との通信時間から距離を算出し，位置を推定する方式である．AOA 方式は基地局と通信機器の電波の到来角度から位置を推定する方式である．TDOA 方式と AOA 方式は RSSI と比較し高精度の位置推定を実現できるという研究結果も出ているが，これらの方式には特別なハードウェアが必要であり，一般的な通信機器では実現できないため，設置費用が依然として高額である．そのため，我々はコスト面における導入の容易さから本研究では，RSSI 方式を用いた位置推定を行う．

一方，我々が構築するサービスに近いものとして，迷子探しサービスがある[2]．これは，施設を約 80m 四方のエリアに分割し，各エリアごとに通信可能な電波環境を構築することで，判定を可能としていた．しかし，エリアごとに分かれた理想的な電波環境を構築するために各基地局の電波の方向と強度の調整という困難な作業が必要であった．したがって，既存の施設への導入は困難であった．また，もう一つの問題として，精度を上げようとすると基地局の設置個数が増大し，基地局を設置する際の電波調整がさらに困難になることがあげられる．

そこで我々は，各基地局の電波の調整が不要で，従来よりも基地局の設置個数の削減が可能な位置推定方式を提案する．

4．電波強度を用いた屋内位置推定方式の提案

ここでは，既存の RSSI 方式である近接性方式，三点測量方式，マルチホップを利用した方式，環境分析方式の 4 つの推定手法とその問題について説明した後，我々が提案する位置推定方式の概要について述べる．

近接性方式は，位置推定の対象範囲内に設置された複数の基地局と通信した際に，最も受信電波の強度が高い基地局を推定位置とする方法である．単位面積あたりの基地局設置個数が少なくなるため設置費用が抑えられるという利点がある．しかし，強度の高い電波を受信した基地局の近くにいる事しか分からないため基地局が少ないと精度が低いという問題が生じる場合がある．

一方，三点測量方式は 3 つ以上の基地局と通信した際の電波強度から距離を算出し位置を推定する方法である．推定される位置は，3 つ以上の円が重なる部分となるため精度は高いが，常に 3 点以上の基地局との通信を行わないといけないため，基地局の設置個数が近接性方式と比べて多くなり，設置コストが増大する問題があった．

マルチホップを利用した方式[19][20]では，基地局と通信機器との三点測量が可能でない場合に，位置座標が推定できる通信機器を基地局として利用することで，三点測量を行う手法である．すべての対象領域において 3 つ以上の基地局と通信できなくても三点測量が可能であるが，多数の通信機器が存在しているという仮定に基づいているため，通信機器を所持している人が周りにいなかった場合測量ができないという問題があった．また，[19]では，壁の反射やシャドウイング等を考慮していないシミュレーションのみでの評価であり，実環境での位置推定精度は不明である．

環境分析方式は， 事前に対象場所での電波強度マップを作成し， ベイズ推定などを用いて最も近似する受信状況の場所を推定する方法である[6]．しかし，電波強度は，人や物があることでも変化するため，ショッピングモールなどの場合展示レイアウトの変更があったり，多くの人が訪れることで精度が落ちるという問題があった．

これらの手法に対し，我々は近接性方式と三点測量方式の長所を組み合わせた手法を提案し，研究してきた[11]．具体的には，電波が 1 つでも届けば近接性方式として利用でき，複数の電波が届けば三点測量方式のようにして範囲を絞り込める．図 1 を用いて説明すると提案手法は A，B，C の基地局から電波強度の異なる複数の電波を発信している．端末に A の基地局の弱い電波と B の基地局の強い電波が到達していることから，端末の位置は斜線部であると推定できる．電波の到達を利用しているため，三点測量方式

よりも精度は落ちるが，推定範囲の単位面積あたりにおける基地局の数の削減が可能である．

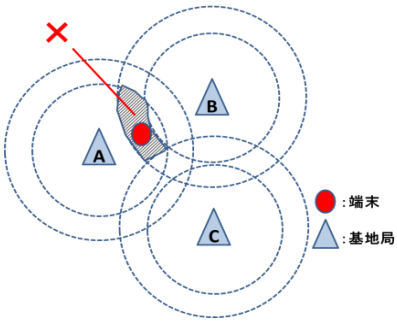

図 1．提案手法

しかし，この方法でも電波の壁や物や人との反射，シャドウイング，マルチパス等の影響で，電波の受信可能範囲が大きく変動するため，推定は容易でない．そのため，本研究では電波強度による各中継器の受信可能性と，施設の構造上の移動制限による人の移動について確率モデルを用いてモデル化する．

5. 確率モデルを用いた位置推定手法

デバイスが一定の時間間隔で，そのデバイス固有の ID にその時の大気圧出力を付加した情報を複数の強度の電波でブロードキャストする．そして，施設内に複数設置された各基地局が，そのブロードキャスト信号を受け取ることで，その固有 ID のデバイスの所持者が施設内のどのエリアにいるのかを推定する．具体的には，施設内での人のエリア移動の確率モデル化と，屋内での電波到達確率のモデル化，大気圧センサが正しい階推定を行う確率のモデル化を行うことで，エリア移動を状態遷移と捉え，電波到達確率と大気圧センサの階判定正解確率を出力とする隠れマルコフモデル（HMM）を構築する．そして，Viterbi アルゴリズムを用いて実時間での位置推定を実現する．

5. 1　人の移動のモデル化

施設内で自由歩行を行っている人の単位時間あたりの施設内の移動をモデル化する．具体的には，対象とする施設の範囲を複数のエリアに分割すると，人がある時間に，あるエリアにいることをひとつの状態として捉えられる．すると，施設内での単位時間によって変化する人の移動を状態遷移と捉えることができる．

屋内の場合には，距離が近くても，壁などがあると通過することができず移動経路としては遠くなる場合がある．そこで，人が移動できる遷移であるかを考慮して遷移確率を設定する．具体的には以下の 3 つの条件が考えられる．

a)　通路では，人が走る速度を上回る速度での移動はできない．

b)　通路が壁で仕切られている，また吹き抜けも通り抜けて移動することができない．

c)　2 階以上ある施設においては，エレベータやエスカレータ，もしくは階段がなければ階を移動できない．

まず，条件 a)について検討する．本研究において，エリアとは，施設に設置した基地局の数を n とした時に，基地局 $i\,(1 \le i \le n)$ を設置した座標 (x_i, y_i, z_i) を中心とした区間とする．区間の幅 w は通信機器の発する電波の最大通信距離である．また，基地局 i とは異なる基地局 $j\,(1 \le j \le n)$ との距離 d_{ij} (式1)が，事前に設定した区間と重なる場合（$d_{ij} < 2w$），基地局i と jを中心とした 2 等分線を区間の境目とする．

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \qquad (1)$$

2 階以上の建物の場合，階段やエスカレータの部分にも状態を作ることで，階を跨いだ状態遷移を可能にする．また，初期状態や一時電波が届かなかった場合，すべての状態遷移の確率が 0 になった時にも遷移ができるよう，全ての状態への遷移確率が等しい状態 s を与える．状態 s 以外の状態遷移の遷移確率は，通信機器の発信間隔と人の移動距離を考慮して設定した．具体的には，人の移動距離は平均が 1．4(m/s)，分散を 2 のガウス分布(式 2)で近似した．自由歩行における人の移動速度は年齢や性別の違いに大きな差がないことが知られている[9]．分散を大きくしたのは子どもが使用した場合に走ることを考慮したためである．ここで求めた人の移動距離の分布に，現在の状態から他の状態への距離d_{ij}(1)を比較して遷移確率を求める．

$$f(d_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left(-\frac{(d_{ij}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) (\mu\text{: 平均}, \sigma\text{: 分散}) \quad (2)$$

次に条件 b) について検討する．推定対象地域内において隠れ状態同士の距離が近くても壁で仕切られていたり，吹き抜け等があると人が通ることができない．そこで，そのような状態同士の遷移確率を 0 にする．最後に，c) については，距離が近くても同じ階ではない状態$(z_i \neq z_j)$は移動できないので，その遷移確率は 0 とする．階段やエスカレータの上に新しく作った隠れ状態とそれに隣接する状態との遷移確率はそのままとする．

5. 2　電波到達のモデル化

屋内に複数設置された基地局への各種電波強度の電波が到達する確率のモデル化について述べる．

電波を受信する場合，受信電力は，送信電力と，送信アンテナ絶対利得，受信アンテナ絶対利得を足し合わせたものから自由空間基本伝搬損失を引いたもので表される(式 3)．送信電力と送信アンテナ絶対利得と受信アンテナ絶対利得は使用する通信機器固有の値であるため，自由空間基本伝搬損失を求めれば受信電力は求まる．自由空間基本伝搬損失は一般に式 4 と式 5 から，周波数と距離の 2 乗によって表される．基地局の受信が可能となる受信電力は基地局固有であるため，式 3 と式 5 から最長距離を求める．その距離が受信可能範囲である．しかし，式 5 から求めた伝搬損失は自由空間と仮定したもので，ガラスや人混みなどが間にあった場合はより損失が大きくなるため，実際には受信可能な距離が大きく変動してしまう．そのため，自由空間での受信電力から求めた受信可能距離を中心とした，ガウス分布(式 1)の累積分布関数を求め，求めた関数を式 6 に代入したものを受信確率とする（図 2）．

$$P_s = P_r + G_s + G_r - L \qquad (3)$$

P_s : 受信電力[dBm]
P_r : 送信電力[dBm]
G_s : 送信アンテナ絶対利得[dBi]
G_r : 受信アンテナ絶対利得[dBi]
L : 自由空間基本伝搬損失[dB]

$$\lambda = \frac{f}{v} \quad (\lambda : 波長(\mathrm{m}), f : 周波数, v : 速さ(\mathrm{m})) \quad (4)$$

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (\mathrm{L}: 損失, \mathrm{d}: 距離(\mathrm{m}), \lambda : 波長(\mathrm{m})) \quad (5)$$

$$\mathrm{F}(x) = 1 - \int_{-\infty}^{t} f(t)\, dt \quad (f(t)は累積分布関数) \quad (6)$$

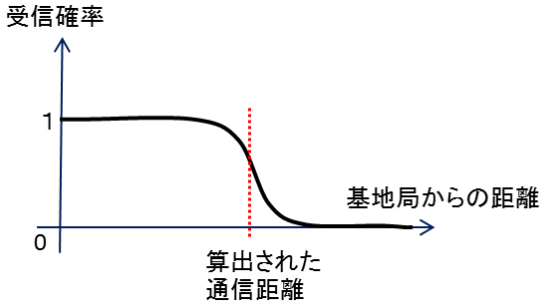

図 2. 受信確率のモデル

5. 3 階推定の正解確率のモデル化

階の誤検出を防ぐために施設内の参照地点における大気圧の測定値とデバイスの測定値の差分から階の推定を行う．このとき，デバイスに搭載した大気圧センサが，歩く振動などで測定値が不安定になるため，正しく階が推定できない可能性がある．そこで，大気圧センサの出力情報を用いて階推定を行ったときに正しい階が求まる確率を階推定正解確率として定義する．

同じ建物内のある参照地点における気圧と温度を常に測定し，子どもがいる高度 z を参照地点に対する相対高度として求めることで階の推定を行う． ここで，気圧と高度の関係は式 7 で与えられ，式 7 の両辺の対数をとると，式 8 のように表せる．ここで式 8 から，参照地点とデバイス所持者のいる地点での気圧と温度が分かれば，参照地点に対する相対高度が求まり，その高度情報から，現在のユーザの階を判定する．しかし，デバイス所持者の走行による上下運動などにより，センサに物理的な衝撃が加わることでセンサの出力に誤差が生じ，正しい階の推定が行われない．そのため推定された階を平均としたガウス分布を大気圧センサの階推定正解確率とする．分散の値は予備実験を行い適切な値を設定した．

$$p(z) = p(z_0) exp\left(\frac{-g(z-z_0)}{R_d \bar{T}}\right) \qquad (7)$$

R_d : 1kg の乾燥空気の気体定数　287[J·K^{-1}·kg^{-1}]
$\bar{T}$: z_0から zまでの平均気温
g : 重力加速度 9. 81[m/s^2]
$p(z_0), p(z)$: 高度z_0, zにおける大気圧

$$z = z_0 - \frac{R_d \bar{T}}{g} log\left(\frac{p(z)}{p(z_0)}\right) \qquad (8)$$

5. 4 隠れマルコフモデルによる定式化

以上述べてきた，人の移動モデル，電波到達モデル，階推定確率を使ったモデルを用いると隠れマルコフモデルが構成できる．つまり，人の移動のモデルを状態遷移確率として，出力確率を電波到達モデルと階推定正解確率モデルとする．このとき電波到来確率と階推定の正解確率は独立であるため，エリア i から j の遷移における出力確率は式 9 となる．

$$P_{ij} = \mathrm{G(z)} \times \mathrm{F}(x) \qquad (9)$$

P_{ij} : 状態 i から j への遷移確率
$\mathrm{G(z)}$: z 階と出力される正解確率
$\mathrm{F}(x)$: x の強度の電波到達確率

5. 5 仮想基地局による基地局の削減

大気圧から算出した階情報を利用して，上下階からの電波のみから現在位置を推定する．

階を跨いで電波を通してしまうため，階の誤検出要因となる吹き抜け構造や木造建築の建物だが，大気圧センサを用いると階推定が容易となる．そのため，上下階からの電波を利用して，位置を推定し特定の階の基地局設置個数を削減することを考える．

吹き抜け構造のあるフロアにおいて，基地局を設置せず，上下階にある基地局と同じ位置に仮想的に基地局が設置されていると考える。そして，仮想の基地局に，通信端末が発した電波が到達する確率を求める．階の情報と，仮想基地局の受信確率を HMM の出力確率として位置推定を行い，ほかの位置推定実験と同様に評価を行った．

6. 実装

つくば市内の大型ショッピングモール， イーアスつくばの 1 階から 3 階通路を使用して実験を行った． 通路の全長は約 300m である． 実験場所は，図 6 のように 2～3 階通路の一部に吹き抜けがあり， 電波は階を跨いで届く構造である．隠れマルコフモデルにおける各隠れ状態は，基地局と基地局の間に 2 等分線を引いて分割した，19 のエリアと 4 ヶ所のエスカレータである（図 5）．

6. 1 デバイス

ユーザが所持するデバイスには無線モジュール XBee と大気圧センサ SCP1000-D01, およびそれらを制御するマイコンを実装した． サイズは 4cm×7cm で，首からぶら下げたり，衣服や持ち物に装着して用いる． 小型かつ軽量であるため，子どもが装着しても動きが阻害されず，負担になることはない(図 3)．

6. 2 基地局の設置

各基地局同士が通信できる範囲内に設置するため，約 30 メートル間隔で設置した． 来客者に不信感を与えないために，研究内容の説明が書かれたポスターパネルを製作し，その中に XBee を実装した基地局を埋め込んだ．厚さ 15 ミリ高さ 1.1 メートルのパネルの一部をくりぬき回路がおさめられている．XBee はメッシュネットワークを構成しており，ある基地局が受け取った情報はほかの基地局の XBee で中継されて情報管理サーバまで伝えられる．

施設の景観を配慮し， ポスターパネルの下部は施設の壁紙と同色にしている． このポスター型の基地局にはバッテリーを内蔵しているタイプとコンセントから電源を供給するタイプの 2 種類がある．バッテリタイプは コンセントの無い場所でも， 位置の制限を受けることなく設置が可能である． また，安全性に配慮して，ポスターパネルは難燃性の素材を使用して作り，角にぶつかって怪我をしないように，角のある部分にはクッション性のある素材を取り付けた．

基地局は 2～3 階の通路の柱に， 来客者の邪魔にならないように設置を行った． 1 階の通路には設置できる箇所がなかったため， 1 階においては， 電波が吹き抜けを通ることを利用し上階に設置した基地局と，大気圧による高度推定によって位置の推定を試みた．

6．3　位置推定手法の実装

デバイスは 5 秒おきに電波強度の異なる 2 種類の電波（1．4dBm と-7dBm）に大気圧の測定値を付与して発信する．発信された電波は電波到達範囲内にある基地局を介して情報管理サーバへ送られる．情報管理サーバでは，デバイスから送られてきた信号を処理し，デバイスの固有 ID，デバイスの発信時刻，基地局に到達した電波強度，基地局の固有 ID，大気圧をデータベースに格納する．データベースに格納された情報から位置推定を行い，推定位置をデータベースに格納する．

図 3．デバイス

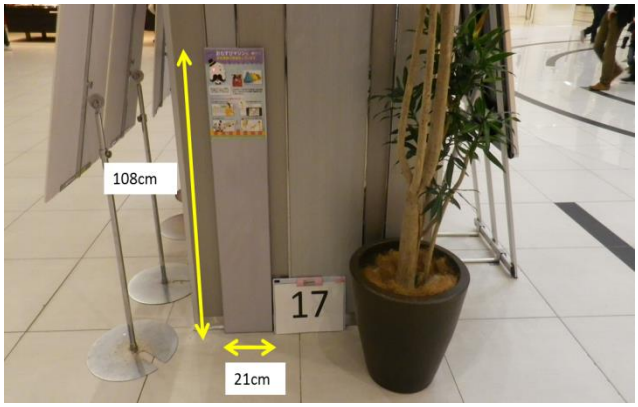

図 4．ポスター型基地局

図 6．イーアスつくばの吹き抜け図

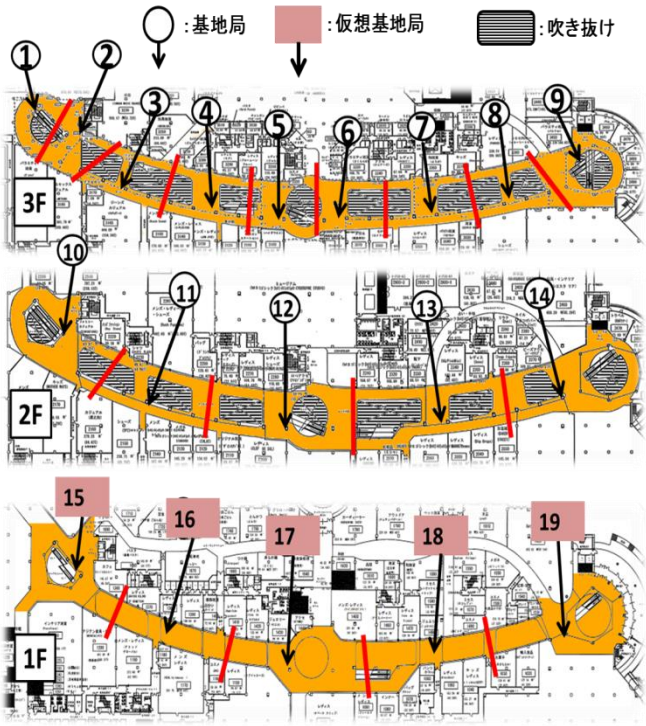

図 5．基地局設置位置とエリア

7．評価実験

本手法によって推定される位置精度を評価するために，位置推定手法を実装し，大型ショッピングモールにて実験を行った．男女計 5 名の大学生がデバイスを所持して 20 分間自由歩行した時の位置推定の精度を確認した．

7．1　実験方法

位置推定の正誤を確認するためには歩行者のエリア移動を正確に記録する必要がある．実験は朝の営業開始前の 8 時から 10 時までの時間を使って行ったが，開店準備のための店員や清掃員がいるため，エリア境界のマーキングを行うことは不可能であった．そこで，我々はマーカの代わりにレーザを用いて実験を行った．

具体的には，位置推定を行う歩行者に対して，各エリア境界を事前によく確認した位置判定員 3 名と，判定結果の記録員 1 名を同行させて実際の歩行者の位置を正確に記録した．以下に，それぞれの役割について述べる．

位置判定員(3 名): 判定員のうち 2 名は歩行者の進行方向を予測してエリア境界に先回りし，その両端で待機する．待機中はレーザポインタで境界に沿って逆の端にいる別の判定員の体に向けてレーザを照射し続ける．残りの 1 名の判定員は歩行者を観察しやすい位置につく．歩行者によってレーザが遮られたのを観測した判定員は，各自所持している旗を上げる．

記録員(1 名): 判定員 3 名中 2 名が旗を上げた時点で歩行者がエリア移動をしたとみなし，移動先のエリア番号とその時刻を記録表に記入する．記録員は電波時計を用いて時刻の記録を行う．なお，デバイスの発信時間は 5 秒に一度のため 観測結果の記録は秒単位で行えば十分と考えた．

7．2　評価．

評価方法は情報管理サーバ内のデータベースに記録された推定結果に対して，ある時刻における観測結果が一致した場合，その時刻における推定結果を正解とする．つまり，位置推定はデバイスが発信するごとに行っており，正解率は，正しく推定できた回数をデバイスの発信個数で割ったものである．

この正解率を，大気圧センサと隠れマルコフモデル(以下 HMM)を用いた位置推定手法と大気圧センサを用いない HMM の位置推定手法，各電波強度の信号に重みを付けて，一定時間内に取得した信号のうち最も重みが高かった基地局を現在地として推定する従来手法[11]との比較を行った．

7．4　結果

実際に大型施設内での位置推定について，HMM と大気圧センサの両方を用いた場合，大気圧センサによる階の推定を行わず HMM のみで推定した場合，および従来手法と比較した（表 1）．その結果，従来手法よりも提案手法を用いた方の正解率が約 24%向上しており，提案手法の有効性が確認できた．吹き抜け付近では，上下階の基地局とも通信を行うが，HMM を利用して過去の履歴を現在の位置に反映させることで，上下階の誤検出に対応することができたと思われる．大気圧を用いるとさらに約 9%の正解率向上が確認された．これは，隠れ状態に階の移動制限を設けただけでは不十分であり，電波のみでは階誤りをすることを示している．大気圧センサと HMM を利用した手法の誤りはエリアとエリアの移動した瞬間には対応できず移動前のエリアと判定してしまうことが主な原因であった．結果を確認したところ，人の移動モデルを入れたことでエリア移動の検知は従来手法よりも早くなっていた．

一方，エリアを誤推定しても，隣接するエリアであれば迷子探しに役立つことから，エリア境界線付近で隣のエリアと取り間違えたものも正解とした場合の正解率を表 2 に示す．結果は従来手法では階の誤検出等で大きくエリアを間違えて推定しているが，HMM を用いて過去の履歴を反映させることで約 15%正解率が向上し，大気圧センサを用いれば 33%ほど正解率が向上した．隣のエリアと取り間違えることはあるものの，サービスとしては十分な正解率であると考えられる．

1 階部分は仮想基地局のため大気圧センサと HMM を用いた位置推定のみで実験をおこなった（表３）．1 階と 2 階とでほぼ同じ正解率であることが示された．これにより，階を跨ぐ電波と大気圧を利用した位置推定の有効性が確認できた．

表 1．正解率

	HMM+大気圧	HMM のみ	従来手法
正解率	79．6%	70．7%	46．5%

表 2．隣接エリアを含めた正解率

	HMM+大気圧	HMM のみ	従来手法
正解率	98．7%	80．8%	65．4%

表 3．各階での正解率

	HMM+大気圧	HMM のみ	従来手法
1 階	89．4%	-	-
2 階	86．63%	80．4%	57．3%
3 階	72．3%	64．9%	41．1%

8．1　まとめ

本稿では，屋内での人の移動のモデル化と電波の到来確率のモデル化，大気圧での階推定精度のモデル化を行い，それらを用いた隠れマルコフモデルに基づく位置推定手法を提案した．同時に，大気圧センサによる階誤りを減らす手法を提案し，大気圧センサと別の階からの電波のみでの位置推定が可能か試みた．

確率モデルを用いてモデル化したことにより，遠く離れたエリアの判定ミスが改善され，従来手法と比較して正解率が 30%改善された．また大気圧センサを用いることで，階誤りの防止だけでなく，基地局を設置していない階でも 90%の正解率で位置を取得できた．

今後，子どもデバイスに加速度センサや心拍センサなどの多くのセンサやカメラを搭載することで，さらに子どもの安心・安全に配慮したサービスの実現を目指して研究を行っていく．

謝辞

実験場所を提供していただいた，イーアスつくば（ダイワハウス工業株式会社）に感謝します．

参考文献

[1] Digi International，“XBee & XBee-PRO OEM RF Module Antenna Considerations”，http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a_XBeeAntennas.pdf

[2] 坂井 宏光，小田倉 淳，山田 文俊，“安全・安心なお買い物環境を実現する屋内基地局測位による迷子探しサービス，” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル 17(2)，46-48，2009-07

[3] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N. 「RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System」Proc. IEEE Infocom 2000, pp. 775–784 (2000).
[4] Manandhar, D., Kawaguchi, S., Uchida, M., et al. 「IMES for Mobile Users SocialImplementation and Experiments based on Existing Cellular Phones for Seamless Positioning」International Symposium on GPS/GNSS (2008).
[5] Lim, H., Kung, L. C., Hou, J. C. and Luo, H. 「Zero-configuration indoor localization over IEEE 802. 11 wireless infrastructure」 Wireless Networks, Vol. 16, No. 2, pp. 405– 420, Springer Netherlands (2010).
[6] 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」情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会，No. 90，pp. 25–31 (2005).
[7] 高島雅弘 他，「ZigBeeTM を用いた屋内位置推定方式(A-21. センサネットワーク，基礎・境界)」電子情報通信学会総合大会講演論文集 p. 366，2005.
[8] 山本裕治，五十嵐雄哉，貞清一浩，「可視光通信技術の施設への応用」，清水建設研究報告，51-56
[9] 山崎真寿，長谷和徳，「自由歩行における歩調・歩幅の生体力学的決定基準」，バイオメカニズム (11)，179-190,
[10] 萩野敦. "無線 LAN 統合アクセスシステム-位置検出方式の検討." DICOMO2003, pp. 569-572, 2003.
[11] M. Hamanaka, Y. Murakami, A, Usami, Y, Miura, and S. H. Lee:System for Detecting Kindergartners'Potential Emergency Situations, World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics 2010(WMSCI2010), Vol. I, pp. 296-301, 2010.
[12] 安在大祐，原晋介. "受信電力による位置推定法と信号到来時間差による位置推定法の性能比較実験" 電子情報通信学会技術研究報告. WBS, ワイドバンドシステム 108(57), 1-6, (2008)
[13] Boon-Giin Lee, Young-Sook Lee, Wan-Young Chung：3D Navigation Real Time RSSI-based Indoor Tracking Application, Journal of Ubiquitous Convergence Technology, Vol.2, No.2, November 2008, pages 67-77
[14] P. Bahl, V.N. Padmanabhan; RADAR: An in-building RFbased user location and tracking system, in: Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, Tel-Aviv, Israel (March 2000), http://www.research.Microsoft .com/padmanab/papers/infocom2000.pdf
[15] J. Hightower, R. Want and G. Borriello; SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, UW CSE00-02-02, February 2000, http://www.cs.washington.edu/homes/jeffro/pubs/hightower2000indoor/hightower2000indoor.pdf
[16] RadioFrequencyIdentification (RFID) home page, http://www.aimglobal.org/technologies/rfid/
[17] Konrad Lorincz, Matt Welsh ; "MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking," Proceedings of the International Workshop on Location and Context-Awareness (LoCA 2005) at Pervasive 2005, May 2005
[18] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System Using AOA," Proceedings of IEEE Infocom 2003, San Francisco, 30 March-3 April 2003, pp. 1734-1743.
[19] 春本要, 藤原謙太郎, 寺西裕一, 秋山豊和, 竹内亨, 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 論文誌ジャーナル 52(5), 1862-1870, 2011-05-00
[20] 山田純弥, 竹中友哉, 峰野博史, 水野忠則,「電子トリアージシステムにおけるモバイルノード利用型 RSSI 位置推定方式」, 情報処理学会論文誌 52(5), 1871-1881, 2011-05-15