

GMMに基づく無線LAN位置推定精度と電波観測情報の関連性評価

梶 克彦^{†1} 河 口 信 夫^{†1}

我々は、無線LAN観測情報をGMMとしてモデル化し位置推定を行う屋内位置情報基盤 indoor.Locky を研究開発している。無線LAN情報の観測には高い人的コストが必要であるが、indoor.Lockyでは、多くの一般ユーザの協力によりデータ収集を行うUGCのアプローチを採用することでこの問題に対処している。indoor.Lockyを実社会で運用するためには、以下に挙げる点を明らかにする必要がある。1. どの程度の間隔で電波を観測すればどの程度の精度で位置推定ができるか、2. 無線LAN基地局密度と位置推定精度の関係、3. 代表値と位置推定精度の関係。これらの情報が明らかになれば、一般ユーザが無駄な労力を払うことなく、必要最小限の観測で屋内位置推定が利用可能になる。また、該当の建物がどの程度の精度で位置推定できるかを判断可能になる。我々は、indoor.Lockyの実証実験を横浜のクイーンズスクエアで行い、収集した無線LAN電波情報を用いて上記の点に関する検証を行った。

Relationship of WLAN Observation Information and Location Estimation Method using Gaussian Mixture Model

KATSUHIKO KAJI^{†1} and NOBUO KAWAGUCHI^{†1}

We are developing an indoor location platform using WLAN named indoor.Locky. The platform adopts UGC (User Generated Content) approach that general users cooperate to gather WLAN information. To put indoor.Locky into practice, we need to figure out the following points. 1: Relationship between the number of observation points and accuracy of location estimation. 2: Relationship between the number of WLAN access points and accuracy of location estimation. 3: Relationship between representing value and ratio of searching on particle filter. If these points are figured out, general users don't pay needless labor-cost. Additionally, the users can be informed how much the accuracy of location estimation in the building is. We conducted experiments in the shopping center to verify above mentioned three points.

1. はじめに

近年、モバイル端末の普及やユビキタス環境の整備に伴い、ユーザや端末のリアルタイムでの位置情報を用いたサービスやアプリケーションの需要が高まってきている。屋外にいるユーザや端末の位置はGPSにより得ることができるが、屋内では電波が弱くなるためGPSを利用できない場合が多い。そこで、屋内でも位置推定を可能にするために、無線LAN、RFタグ、赤外線、IMESなどを用いた研究が進められている^{1)-5),7),8),10),11)}。特に無線LANに基づく位置推定は、既に家庭や公共施設に広く設置されている基地局を利用できるため、屋内位置推定の準備に必要なコストを抑えることができる。

我々はこれまでに、無線LAN観測情報をGMMとしてモデル化し位置推定を行う手法を提案した¹¹⁾。本手法を任意の建物で利用可能にするべく、屋内位置情報プラットフォーム indoor.Locky を研究開発している⁹⁾。藤田らの手法は無線LAN情報の観測を行うための人的コストが高いことが問題とされているが、indoor.Lockyでは、一般ユーザが携帯端末等を用いて建物情報、フロアマップ、無線LAN観測情報を投稿してもらい、それを共有するというUGCのアプローチを採用することでこの問題に対処可能であると考えられる。複数の位置情報プロジェクトでもUGCが採用されており、実際に多くの一般ユーザの協力に基づき無線LAN観測情報が収集されている^{6),8),12)}。

ここで、indoor.Lockyを実運用するためには、以下に挙げる点を明らかにする必要がある。

- 1 無線LAN観測地点密度と位置推定精度の関係
- 2 無線LAN基地局密度と位置推定精度の関係
- 3 各地点での観測回数と代表点

1,3の情報が明らかになれば、一般ユーザが無駄な労力を払うことなく、必要最小限の観測で屋内位置推定が利用可能になる。2からは、対象となる建物ではどの程度の精度で位置推定が可能であるかを判断でき、また必要に応じて位置推定精度向上のために基地局を配置する指針を示すことも可能になる。

我々は、indoor.Lockyの実証実験を横浜のクイーンズスクエアで行い、商業施設における無線LAN電波情報を収集した。本稿では、indoor.Lockyの実運用を目指し、収集したデータを詳細に分析することにより上に挙げた点を明らかにする。

^{†1} 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

2. indoor.Locky

無線 LAN 屋内位置情報基盤 indoor.Locky は、任意の建物の無線 LAN 情報を効率的に収集できるよう、UGC ベースのアプローチを採用している。任意のアプリケーションから屋内位置情報を利用可能にするため、ユーザから投稿される無線 LAN 情報を統合し管理する Web サービスと、個人が持つ端末側で動作するクライアント (PC 用, iPhone/iPad 用など) に分割して実装を行っている。

indoor.Locky 利用の大まかな流れは以下のとおりである。まずクライアントで無線 LAN 観測を行い、そのデータを Web サービスへ観測データをアップロードする。Web サービスでは随時無線 LAN 観測情報を位置推定に適したモデルに変換する。クライアントは Web サービスに再度アクセスして、生成されたモデルをダウンロードし、そのモデルと現在の無線 LAN 情報を比較することで位置推定を行う。

2.1 無線 LAN 情報観測

屋外では GPS を利用できるため、観測ツールをスタートさせて移動するだけで地理座標と無線 LAN 情報が自動でマッピングされていく^{3),8),12)}。一方屋内では GPS の電波が届かないことが多いことから、移動するだけでは位置と無線 LAN 情報のマッピングが行えない。そこで、屋内で無線 LAN 情報を観測する際には、自身がフロア画像をタップしたりクリックしてどこにいるのかをシステムに通知し、その時の位置と無線 LAN 観測情報に対応づけて記録していく (図 1)。

2.2 GMM によるモデル化

観測データを Web サービスに送信すると、Web サービスは複数ユーザがアップロードしたデータを統合し、各フロアの基地局ごとに自動的にモデリングする。モデリングには GMM (Gaussian Mixture Model) を用いる¹¹⁾。クライアントは再度 Web サービスにアクセスし、無線 LAN 情報モデルをダウンロードすることで、そのフロアの位置推定を行う準備が完了する。既にフロアのモデリングが完了した後でも、追加で無線 LAN 観測データが投稿された際には再度 GMM への変換を行い、モデルを更新する。

2.3 位置推定

クライアントは、Web サービスからダウンロードした GMM モデルに基づき、Particle Filter で現在位置の推定を行う¹¹⁾。クライアントではリアルタイム位置推定の結果を Particle の分布として閲覧することができ (図 2)、ブラウザや任意のアプリケーションは API を通じてクライアントにアクセスし、推定位置 (Particle の重心) を取得できる。ただし、位置



図 1 屋内無線 LAN 情報観測クライアント (iPad)

Fig. 1 Indoor WLAN observation client.

推定情報を利用するブラウザやアプリケーションは、クライアントと同一端末で動作する必要がある。

3. 実 験

indoor.Locky は UGC に基づくシステムであるため、多くのユーザが高コストの処理を分担することで一人ひとりのコストを下げる可以降低。ただし、分担された一人当たりのコストが高かったり、どの程度の作業をしなければならないかが不明であれば多くのユーザからの協力を得ることは困難であろう。また、必ずしも建物内に十分に無線 LAN アクセスポイントが設置されているとは限らないため、せっかく多くのユーザが観測をおこなっても位置推定精度を高くすることができない。そこで、本実験では、以下に挙げる 3 点を明らかにする。

- 1 無線 LAN 観測地点密度と位置推定精度の関係
- 2 無線 LAN 基地局密度と位置推定精度の関係
- 3 各地点での観測回数と代表点

1,3 の情報が明らかになれば、一般ユーザが無駄な労力を払うことなく、必要最小限の観測で屋内位置推定が利用可能になる。2 からは、対象となる建物ではどの程度の精度で位置

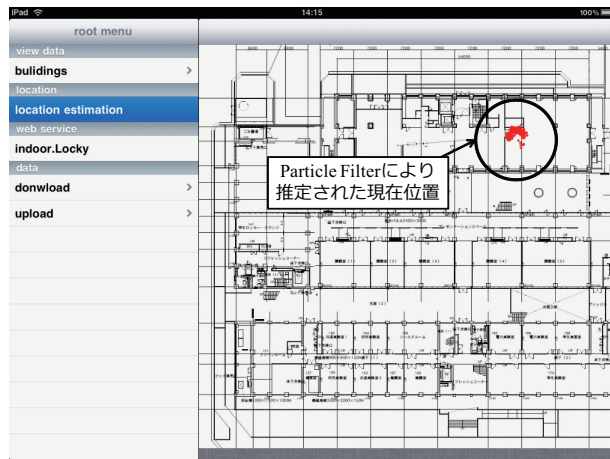


図 2 Particle Filter によるリアルタイム屋内位置推定の様子

Fig. 2 A scene of real-time indoor location estimation using particle filter.

推定が可能であるかを判断でき、また必要に応じて位置推定精度向上のために基地局を配置する指針を示すことも可能になる。

3.1 無線 LAN 情報観測環境

本実験は、横浜にある商業施設クイーンズスクエアにおいて行った。実験期間中、本施設の一部であるクイーンズイーストでは、経済産業省 G 空間プロジェクトの一環である位置情報サービス体験イベントが行われ、無線 LAN 基地局はクイーンズイーストの B1F, 1F, 2F に、各フロアにつき 15 個程度ずつ分散して設置された。今回の実験では、このプロジェクトのために設置された無線 LAN 基地局の電波情報のみを利用し、またクイーンズイースト 1F(図 3) のみを実験対象フロアとした。実験日 (2011 年 2 月 16 日) には、本施設は平常営業しており、多くの一般客が来館した。

実験データの収集は以下のように行った。まず、クイーンズイースト 1F の縮尺の正しいフロアマップを CAD データを基に作成し (図 4), indoor.Locky の Web サービスに建物とフロア登録を行った。次に、3 人の実験者が iPhone の indoor.Locky クライアントからクイーンズイーストの建物情報、フロアマップ等をダウンロードし、フロア内を手分けして無線 LAN 観測を行った。3m 程度の間隔で、各地点につき 5 回無線 LAN 観測を行い、フロア内を観測した (図 4 左)。対象としたフロア面積は約 $2870m^2$ であり、合計 285 地点で観測を行ったため、約 $100m^2$ に 10 箇所の割合で観測したことになる。3 人の実験者が収集し



図 3 実証実験フロアの風景

Fig. 3 A snapshot of evaluation floor.

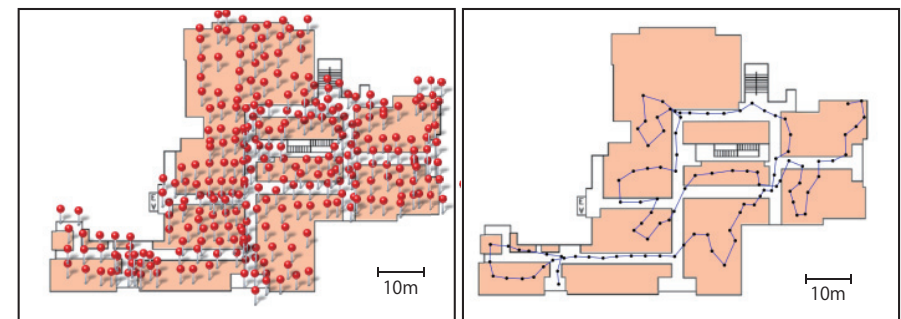


図 4 観測地点 (左), 評価用移動データ (右)

Fig. 4 Observation points (left), Test data (right)

たデータはクライアントを通して Web サービスにアップロードされ、Web サービス側ではそれらを自動的に統合し、位置推定に使用するための各基地局の GMM を生成した。また、位置推定精度評価用の移動データとして、2 人の実験者がフロア内をウィンドウショッピングするように自由に移動し、3m 程度の間隔で、各地点につき 1 回無線 LAN 観測を行った。図 4 右は 1 人分の移動データである。移動データの 2 人分の合計は 666m(220 箇所) である。このデータも同様にクライアントを通して Web サービスにアップロードした。

3.2 実験設定

位置推定の評価実験は以下の通りに行った。まず indoor.Locky クライアントの位置推定に関する機能を拡張し、移動データをもとに無線 LAN 電波環境をシミュレート可能にした。位置推定の精度検証はこのシミュレーション機能を用いて実施した。位置推定に用いるパラメータは表 1 のとおりである。Particle Filter に関するパラメータは藤田ら¹¹⁾の論文に基づいて決定した。また、歩行速度はウィンドウショッピングを想定し 1m/s とした。移動データの観測地点間隔はおよそ 3m であるため、無線 LAN 電波の更新は 3 秒に 1 回程度の間隔となる。iPhone では 3 秒に 1 回程度の無線 LAN 電波観測は可能である。本実験では、Particle Filter を 1 回更新するごとに Particle の重心と移動データの正解座標との距離を求め、それらを全移動データにおいて平均したものを位置推定誤差とした。ただし、Particle の分散が一定以上 (標準偏差: 7m 以上) の場合には、Particle が広範囲を探索中であるとみなし、位置推定誤差を算出しないものとした。

表 1 実験の条件設定
Table 1 Parameters of experiments.

Particle 数	300 個
Particle Filter 更新	1 秒に 1 回
使用する電波強度の閾値	-70dBm
歩行速度	1m/s
無線 LAN 電波更新	3 秒に 1 回程度

3.3 観測点密度と位置推定精度の関係

無線 LAN 観測密度と位置推定精度の関係を明らかにするために、観測地点数をランダムに間引きし、密度を変化させた状態で GMM によるモデル化し、位置推定精度の検証を行った。本実験では各地点の 5 回の観測情報のうち 1 回目の情報のみを用いた。まず観測地点の密度の違いによって、GMM の形状がどのように変化するかを図 5 に示す。図 5 左

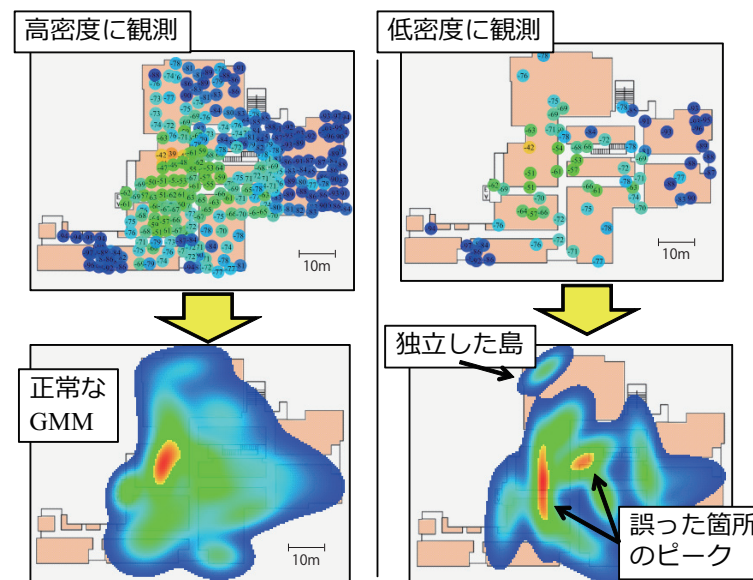


図 5 観測密度の違いによる GMM 形状の違い

Fig. 5 Difference of GMM's form related to the number of observation points.

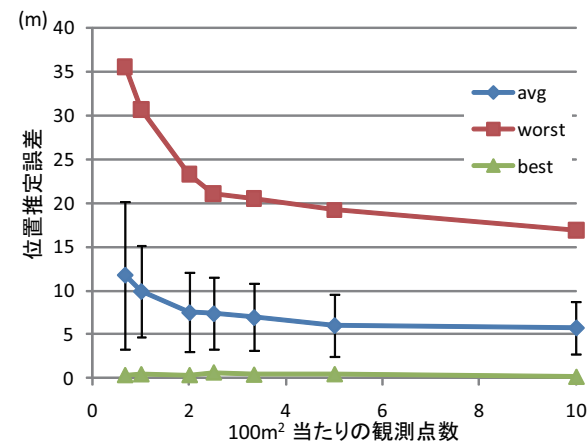


図 6 観測地点数と位置推定精度の関係

Fig. 6 Relationship between the number of observation points and accuracy of location estimation.

は、本実験で $100m^2$ 当たり 10 箇所を観測したデータを使用して生成した GMM であり、右は $100m^2$ 当たり 2.5 箇所を観測した状態に観測データをランダムに間引きし、その観測データを用いて生成した左と同一基地局の GMM である。高密度に観測した場合には各基地局の GMM はなめらかな形状となることがわかる。一方密度が観測密度が不十分な場合、独立した島ができてしまったり、本来はない箇所にピークが表れてしまう。このような島や誤った箇所のピークが存在すると、Particle Filter による位置推定の際にそれらの極地に陥る可能性が高くなるため、位置推定精度低下の原因となる。

観測密度を変化させて GMM を生成し、それに基づいて Particle Filter を行った場合の位置推定精度を図 6 に示す。図 6 は、横軸が観測地点の密度 ($100m^2$ 当たりの観測点数)、縦軸を位置推定誤差とした時の位置推定誤差を表している。中央の線は誤差平均と標準偏差を、上下の線は最も位置推定精度が悪くなったときと良くなったときの誤差を示している。この図から、観測地点数が増えるほど位置推定精度が向上し、位置推定精度は 5m 程度まで改善できることがわかる。しかし、 $100m^2$ 当たりの観測点数が 5 か所の時と 10 か所の時を比較すると、誤差平均、標準偏差ともほぼ変化していない。 $100m^2$ 当たりの観測点数が 5 か所より少ない場合、生成される GMM には図 5 右に示すような独立した島や誤ったピークが存在することが多くなり、その結果 Particle がそれらの狭い範囲の極地に陥ることが多くなり、位置推定精度が低下したと考えられる。シミュレーションの様子を観察したところ、 $100m^2$ 当たりの観測点数が 5 箇所より少ない場合には、Particle の集合が、飛び石のごとく狭い範囲の極地への収束と次の極地への移動を行う場面が多々みられた。よって、本システムで位置推定を行う際、 $100m^2$ 当たりの観測点数を 5 か所程度にすると、作業コストと位置推定精度のバランスがもっとも良くなる。藤田らの行った評価実験では、大学内の実験環境を対象として 5~10m 程度の位置推定精度を実現したが¹¹⁾、今回の実証実験により、本手法が一般客の行き交う商業施設のような実環境でも同等程度の精度で位置推定できることが確認された。

3.4 基地局密度と位置推定精度の関係

位置推定の対象となる建物に設置された基地局数が少なければ、たとえ多くの地点での無線 LAN 電波観測を行ったとしても十分な精度での位置推定が困難である。基地局密度と位置推定精度の関係を明らかにすることで、該当フロアでは潜在的にどの程度の位置推定精度を得られるかをユーザに示すことができる。また、十分な位置推定精度が得られない場合には、どの程度新規基地局を設置すればよいかを示す指針ともなる。

本実験環境では、B1F:14 個、1F:16 個、2F:14 個の合計 44 個の基地局が設置されてお

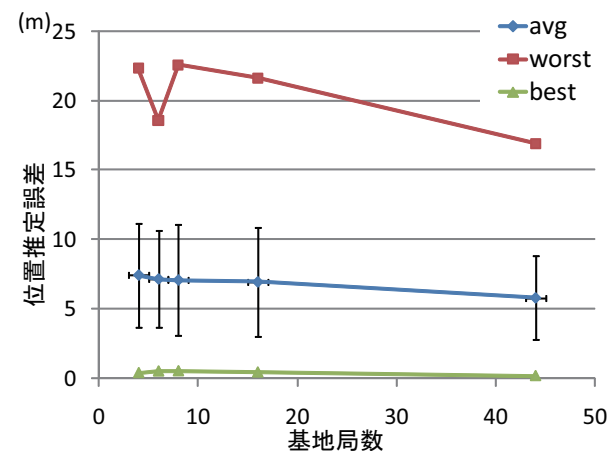


図 7 基地局数と位置推定精度の関係

Fig. 7 Relationship between the number of WLAN access points and accuracy of location estimation.

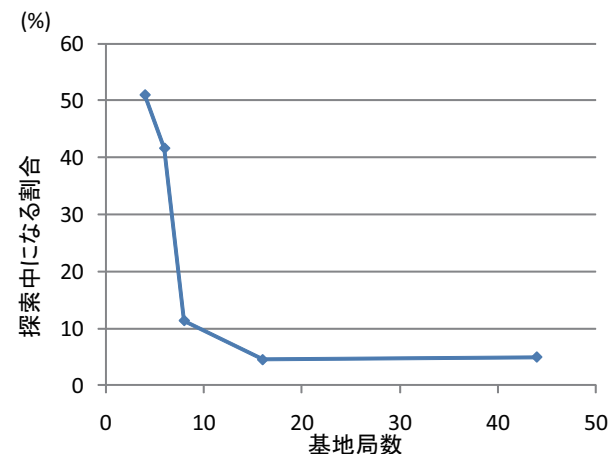


図 8 基地局数と Particle Filter が探索中になる割合の関係

Fig. 8 Relationship between number of WLAN access points and ratio of searching on particle filter.

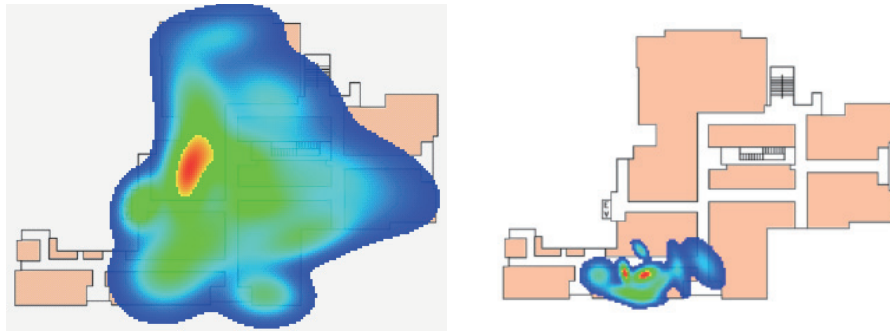


図 9 同一フロア (左) と別フロア (右) に設置された基地局の電波分布
Fig.9 Examples of wave distribution placed in same/different floor.

り、各フロアの面積は約 $2870m^2$ であった。収集した観測データから、基地局を 44 個、16 個、8 個、6 個、4 個と段階的に間引き、位置推定精度との関係を検証した。ここで、44 個から 16 個への間引きは、位置推定対象フロアの 1F 以外に設置されている基地局を間引いた。また、16 個より少数への間引きは、前節で行った観測地点の間引きと異なり、人の手で均等に分散するように間引いた。これは、もともとの基地局の数が少ないため、ランダムに間引くと偏りが大きくなる場合があると考えたからである。また、本実験では各地点の 5 回の観測情報のうち、1 回目の情報のみを用いた。

実験結果を図 7 に示す。まず B1F, 1F, 2F に設置された 44 個から 1F に設置された 16 個のみへの間引きに注目してみると、推定精度が 5.7m から 6.9m に低下している。このことから、位置推定には別フロアに設置された基地局の電波情報が有効であるといえる。図 9 に同一フロアと別フロアに設置された基地局の電波分布の例を示す。別フロアに設置された基地局の方が同一フロアに設置された基地局よりも狭い範囲で観測されていることがわかる。このような基地局の電波情報は、たとえ受信できる電波強度が弱くても、推定位置の絞り込みに利用可能である。

次に基地局数を 16 個からさらに間引きしたところ、緩やかな位置推定精度の低下がみられた。ただし、図 8 に示すように、Particle Filter が探索中となる確率が基地局数 10 個付近から極端に増加している。たとえば基地局数 4 個の場合、位置推定精度は 7.4m であったが、全ステップのうち 51%については Particle Filter が広範囲を探索中となり現在位置を提示することができなかった。これより、50m 四方程度のフロアに対して最低 10 個程度の基地局が必要といえる。

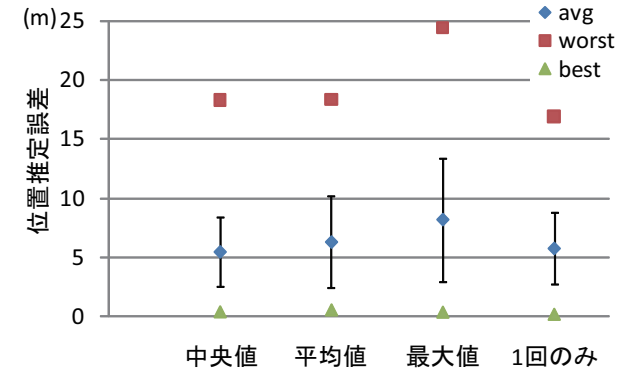


図 10 代表値と位置推定精度の関係

Fig.10 Relationship between representing value and ratio of searching on particle filter.

3.5 代表値と位置推定精度の関係

一般に、無線 LAN 電波強度は必ずしも安定して一定の値で受信できるとは限らない。そのため、同一地点で複数回観測した電波強度の代表値を用いることで、その地点におけるより正確な電波情報を獲得することができる。そこで、現実的な代表値として中央値、平均値、最大値を挙げ、それぞれの代表値と位置推定精度の関係を検証した。本実験では、各地点で 5 回の電波観測を行っている。5 回の観測に必要な時間は、iPhone で約 15 秒、iPad で約 30 秒であり、一般ユーザが静止して観測する時間の限界と考えた。

図 10 に実験結果を示す。中央値をとった場合、位置推定精度は 5.5m であり、最も高い位置推定精度であった。電波の受信強度が極端に高くなったり低くなったりする場合があるため、最大値や、ガウス分布を仮定する平均値はふさわしくないといえる。ただし、1 回のみ観測情報を用いた場合の 5.9m と比較して大きく改善されるものではなかった。よって、各地点で 1 回のみ観測しただけでも、位置推定精度に大きく影響しないといえる。

4. おわりに

本稿では、屋内位置情報基盤 indoor.Locky の無線 LAN 位置推定精度に関する評価実験を行い、以下の 3 点を明らかにした。

- $100m^2$ につき 5 か所程度で観測するともっともコストパフォーマンスが高い。
- $50m$ 四方程度のフロアに対して最低 10 個程度の基地局が必要である。また別フロアに設置された基地局の電波も位置推定精度の向上に貢献する。

- 1 地点で複数回観測した場合はその中央値をとるとよいが, 1 回のみ観測でも位置推定精度は大きく低下しない.

これらの実験結果を用いることで, 一般ユーザが無駄な労力を払うことなく, 必要最小限の観測で屋内位置推定が利用可能になる. また, 対象となる建物ではどの程度の精度で位置推定が可能であるかを判断したり, 必要に応じて位置推定精度向上のために基地局を配置する指針を示すことが可能になる.

今後は, 屋内位置情報基盤としての機能を充実させ, 一般公開を目指す. また, スマートフォンに搭載されたセンサを用いたり, SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)の技術を応用することで, より観測コストを下げることを検討している.

参 考 文 献

- 1) Bahl, P., and Padmanabhan, V. N. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. In *Proceedings of IEEE Infocom 2000*, pp. 775–784, 2000.
- 2) Cheverst, K., Davies, N., Mitchell, K., and Friday, A. Experiences of developing and deploying a context-aware tourist guide: the GUIDE project. In *Proceedings of the Sixth of an Annual International Conferences on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000)*, pp. 20–31, 2000.
- 3) LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., et al. Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild. *Third International Conference Pervasive 2005, Lecture Notes in Computer Science(LNCS3468)*, pp. 116–133, 2005.
- 4) Lim, H., Kung, L.C., Hou, J.C., and Luo, H. Zero-configuration indoor localization over IEEE 802.11 wireless infrastructure. *Wireless Networks, Springer Netherlands*, Vol.16, No.2, pp. 405–420, 2010.
- 5) Manandhar, D., Kawaguchi, S., Uchida, M., et al. IMES for Mobile Users Social Implementation and Experiments based on Existing Cellular Phones for Seamless Positioning. In *International Symposium on GPS/GNSS*, 2008.
- 6) OpenStreetMap. <http://www.openstreetmap.org/>.
- 7) Seidel, S., and Pappert T. 914Mhz Path Loss Prediction Model for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings. In *Proceedings of IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 207–217, 1992.
- 8) 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コビキタス通信研究会, No.90, pp. 25–31, 2005.
- 9) 梶克彦, 河口信夫. indoor.Locky: 屋内位置推定のための 無線 LAN 情報プラットフォーム. 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとコビキタス通信研究会

- , Vol. 2010-MBL-56, No.1, pp. 1–6, 2010.
- 10) 中村嘉志, 並松祐子, 宮崎伸夫, 松尾豊, 西村拓一. 複数の赤外線タグを用いた相対位置関係からのトポロジカルな位置および方向の推定. 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp. 1349–1360, 2007.
 - 11) 藤田迪, 梶克彦, 河口信夫. Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法. 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp. 1069–1081, 2011.
 - 12) 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. インターネットコンファレンス, pp. 95–104, 2006.