

三次元都市モデルと GPS 信号の SNR を用いた 携帯端末の存在領域判定

上嶋 祐紀^{1,a)} 内山 彰^{1,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)}

概要: 本研究では都市部における GPS を用いた高信頼な端末の存在領域推定を目標に、都市部の 3 次元モデルを利用した手法を提案する。提案手法では、各地点と各 GPS 衛星の間に障害物が存在する状態 (NLOS:None-Line-Of-Sight) であるか、または存在しない状態 (LOS:Line-Of-Sight) であるかを事前に計算し、フィンガープリントとする。携帯端末が受信した GPS の Signal to Noise Ratio (SNR) から LOS/NLOS を学習データに基づき判定し、その判定結果とフィンガープリントに応じて各地点に端末が存在している尤度 (存在尤度) を決定する。しかし、フィンガープリントとのマッチングのみではフィンガープリントの境界付近において安定した結果が得られない場合がある。そこで、提案手法では短期間の SNR 分布に対する統計量から端末の移動に伴う LOS/NLOS の切り替わりを検知する。これによって、フィンガープリントの境界を通過した場合に切り替わり後の地点の存在尤度を一時的に高めることができ、安定した結果が得られる。フィンガープリントの境界通過検知について大阪大学構内で実験を行った結果、検知率、正解率はともに高いことがわかり、平均を用いた場合は検知率は 97%、正解率は 95%、遅延時間は 3.5 秒、変化量を用いた場合は検知率は 84%、正解率は 98%、遅延時間は 1.9 秒となることがわかった。

1. はじめに

スマートフォンなどの携帯端末の普及とともに、位置情報を用いた数多くのサービスが提供されている [1-3]。これらのサービスにおける位置情報の取得には、Global Positioning System (GPS) や WiFi、加速度センサなどが利用される。中でも GPS は衛星を利用した方式であるため、衛星からの電波を受信可能な屋外における測位方式として幅広く使われている。一般に GPS 衛星からの擬似距離情報が多いほど測位は高精度になるため、見通しの良い屋外では測位誤差は小さくなる。しかし、多くのビルが存在する都市部では GPS 信号の反射、回折によるマルチパスや遮蔽の影響により電波到達時間が増加し測位誤差が数十 m 以上に増加したり、雑音が増加することで信号の復号ができなくなる場合がある [4]。

都市部におけるこのような問題を解決するため、アンテナを工夫して反射波の多い低仰角方向の信号を受信しにくくする方法 [5] や、信号レベルでの処理方法を改良するこ

とで減衰した GPS 信号を復号する手法 [6] などが考案されているが、携帯端末での実現は難しいことや、ハードウェアコストが問題である。「みちびき」のように新たな準天頂衛星を打ち上げ、衛星数を増やして都市部での GPS 精度を向上させる取り組みも世界各国で進められている [7] が、GPS の測位精度は衛星の幾何的な配置が偏ると低下するため、ビルの多い都市部では本質的な精度の問題が残る。このため衛星数を増やすだけでなく、測位方式の工夫も併用して精度向上を目指すことが望ましい。一方で主に GPS の利用できない屋内を対象に、携帯電話や WiFi の基地局からの電波強度に基づき位置を推定する手法 [8] も存在するが、誤差は基地局の配置と推定対象の位置によって数十 m から数百 m に及ぶため、道路セグメント単位での推定が失敗する場合もある。その他にも加速度センサや電子コンパスを用いた自律航法 [9] では、推定された移動距離と方向の積み重ねによって相対位置を求める。また、測位結果から得られる移動軌跡を移動可能な領域情報と組み合わせることで位置を補正するマップマッチング [10-12] なども提案されている。これらの手法はいずれも GPS などを用いて基準となる位置情報を断続的に取得し、併用することで位置精度の向上を図っている。測位手法は環境によって精度が異なるため、都市環境で常に高い測位精度を実現するためには、このように様々な測位手法の併用が重

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science & Technology,
Osaka University,
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) y-uejima@ist.osaka-u.ac.jp

b) utiyama@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

要となる。

そこで我々の研究グループでは、都市部における GPS を用いた高信頼な端末の存在領域推定を目標に、都市部の 3 次元モデルを利用した手法を提案している [13]。提案手法では、各地点と各 GPS 衛星の間に障害物が存在する状態 (NLOS:None-Line-Of-Sight) であるか、または存在しない状態 (LOS:Line-Of-Sight) であるかを事前に計算し、フィンガープリントとする。携帯端末が受信した GPS の Signal to Noise Ratio (SNR) から LOS/NLOS を学習データに基づき判定し、その判定結果とフィンガープリントに応じて各地点に端末が存在している尤度 (存在尤度) を決定する。しかし、フィンガープリントとのマッチングのみではフィンガープリントの境界付近において安定した結果が得られない場合がある。このため、本研究では文献 [13] で提案したフィンガープリントマッチングに基づく存在領域推定に加えて利用可能なフィンガープリントの境界通過検知法を提案する。本検知法では、短期間の SNR 分布に対して、平均、分散、平均の変化量という 3 種類の統計量から端末の移動に伴う LOS/NLOS の切り替わりを検知し、フィンガープリントの境界を通過した場合に切り替わり後の領域の存在尤度を一時的に高めることで、安定した結果が得られるようにする。

フィンガープリントの境界通過検知について大阪大学構内で実験を行った結果、統計量として LOS 確率の平均を用いた場合では検知率は 97%、正解率は 95%、遅延時間は 3.5 秒であり、変化量を用いた場合では検知率は 84%、正解率は 98%、遅延時間は 1.9 秒となることが確認できた。この結果から、高い検知率が求められる場合には、やや遅延が大きくなるものの統計量として平均を用いれば良く、迅速かつ正解率の高い境界通過検知が求められる場合には、変化量を用いることが適当であることが分かった。

2. GPS 信号の SNR を用いた存在領域判定

2.1 提案手法の概要

提案手法では、対象領域を $w(m) \times w(m)$ のセルに分割し、各セル c は時刻 t においてセル内に端末が存在している確からしさ (存在尤度) $l^t(c)$ を保持する。存在尤度は、前時刻に更新された存在尤度 $l^{t-\Delta t}(c)$ 、GPS の受信状態フィンガープリントとのマッチング結果、およびフィンガープリント境界通過検知の結果に基づき、 Δt 秒ごとに更新される。フィンガープリントは都市の 3 次元モデルを元に事前に構築しておく。

フィンガープリントのマッチングでは、時刻 t に得られた各 GPS 衛星の LOS, NLOS 確率に応じて、フィンガープリントに基づき各セルの存在尤度を得る。一方、フィンガープリント境界通過検知では、期間 $[t - W, t]$ における各衛星の LOS 確率の分布から算出される平均、分散、変化量などの統計量に基づき、期間 $[t - W, t]$ において衛星

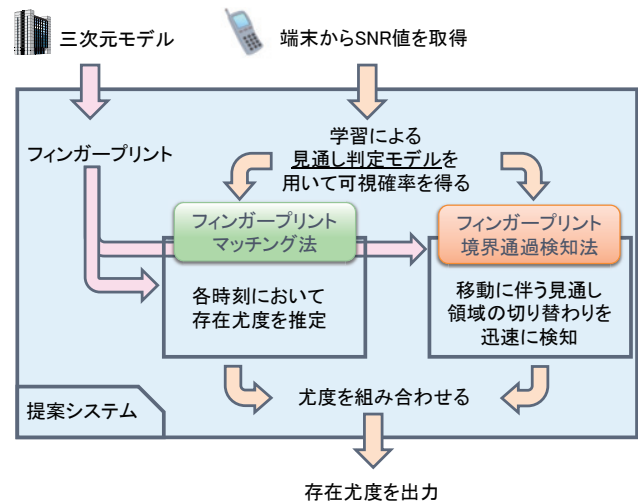


図 1 システム構成

i の LOS/NLOS の変化の有無を検知し、存在尤度を得る。これらの存在尤度と、前時刻に更新されたセル c の存在尤度 $l^{t-\Delta t}(c)$ を統合することにより、時刻 t における各セル c の存在尤度 $l^t(c)$ を算出する。フィンガープリントマッチング、境界通過検知、存在尤度の統合の詳細はそれぞれ 2.6 節、2.7 節、2.8 節で述べる。端末の存在領域判定は、以上のようにして時刻 t における各セルの存在尤度を算出した後、最も存在尤度の高いセル集合を決定することにより行う。

フィンガープリントのマッチング、および境界通過検知はどちらも GPS 衛星が LOS (NLOS) である確率に基づき行われる。衛星は常に LOS または NLOS のいずれかであるため、GPS 衛星 i の SNR を s_i とすれば、 i が LOS である確率 $p_{LOS}(s_i)$ と NLOS である確率 $p_{NLOS}(s_i)$ には以下の関係が成り立つ。

$$p_{LOS}(s_i) + p_{NLOS}(s_i) = 1 \quad (1)$$

$p_{LOS}(s_i), p_{NLOS}(s_i)$ を算出するため、LOS, NLOS である時の SNR を事前に収集し、学習データとして利用した見通し判定モデルを構築する。見通し判定モデルの詳細は 2.4 節で述べる。

2.2 システム構成

提案手法のシステム構成を図 1 に示す。事前に計算したフィンガープリントはサーバで保持しても良いし、ユーザ端末側で保持し、サーバを介さずにマッチング処理を行っても良い。

各端末は Δt 秒ごとに GPS 衛星 $1, 2, \dots, n$ の信号を受信し、それぞれの SNR を

$$\vec{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$$

として記録する。記録した各 SNR s_i について、サーバまたはユーザ端末上で見通し判定モデルを用いて

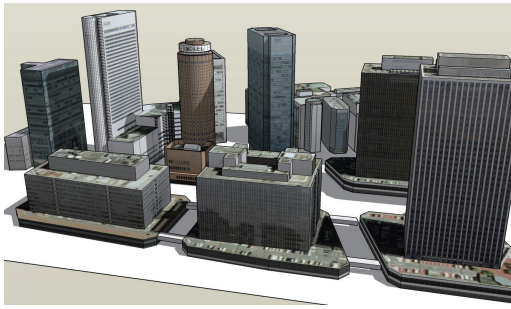


図2 大阪駅周辺の3次元モデル

$p_{LOS}(s_i), p_{NLOS}(s_i)$ を求める。その後、フィンガープリントマッチング、およびフィンガープリント境界通過検知それぞれで存在尤度を算出し、統合することで得られた存在尤度に基づき、現在の端末の存在領域判定を行う。サーバでこれらの処理が行われる場合、判定結果はサーバからユーザに返される。

2.3 フィンガープリントの構築

フィンガープリントは三次元都市モデルと衛星位置から算出されるGPS衛星の見通し状況に基づき構築される。三次元都市モデルには精度は劣るが建物の公称値から作り出した簡易的な三次元モデルを用いても良いし、階数と平均的な1階あたりの高さから推定して作り出したものでも構築は可能である。またTrimble 3D Warehouse [14]で公開されているような三次元都市モデルを用いることもできる。Trimble 3D Warehouseのようなユーザ参加型の三次元都市モデルを用いることで、三次元都市モデルの構築をクラウド化により低コストでフィンガープリントを作成できる。一方、精密な建物の形状と配置を再現した三次元都市モデルの構築を行うことで精度良いフィンガープリントの構築も可能である。

図2はJR大阪駅前周辺のビル群を3次元モデルで表した物である。提案手法では、このような対象領域の3次元モデルと天空上の衛星の位置に基づき、フィンガープリントを構築する。対象領域の各地点において、特定の位置にある衛星の見通し状況の計算は、衛星を光源と見なした時の光（可視領域）と影（不可視領域）の計算に等しい。したがって、フィンガープリントの構築はコンピュータグラフィックスの分野で光源と物体に対する光と影を計算するレイトレーシング法 [15] などのアルゴリズムを用いて実現可能である。フィンガープリントの計算は各衛星の位置に対して一度だけ実行すれば良く、事前にサーバでの計算が可能であるため、本研究ではフィンガープリントの計算アルゴリズムの詳細は扱わない。

フィンガープリントはセル c ごとに定義され、衛星 $1, 2, \dots, n$ それぞれの c における見通し状況 $LOS_i(c)$ のベクトルで表される。見通し状況 $LOS_i(c)$ は衛星 i がセル c においてLOS/NLOSのどちらであるかを表すバイナリ変

数であり、以下の式で定義される。

$$LOS_i(c) = \begin{cases} 1 & (\text{iff } i \text{ is LOS}) \\ 0 & (\text{iff } i \text{ is NLOS}) \end{cases}$$

以下にフィンガープリントの構築例を示す。図3(a), (b)は衛星 g_1, g_2 についてNLOS, LOSになる領域をそれぞれ示したものである。衛星 g_1, g_2 の見通し状況を重ねることで、図3(c)のように対象領域は4つの領域に分割されることになる。すなわち、対象領域内の任意のセル c におけるフィンガープリント $fp(c) = (LOS_1(c), LOS_2(c))$ は、

$$\{(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)\}$$

のいずれかとなる。同様にして n 個の衛星が存在する場合には、対象領域は最大で 2^n 個の領域に分割される。

なお、仰角が低い衛星は簡易的な3次元モデルでは再現できないような小さな障害物や人体による遮蔽の影響を受けやすい。従って3次元モデルで計算した衛星の見通し状況が実際と合わない場合が多くなるため、仰角が閾値 ϕ_{TH} 以下の衛星は利用しないものとする。実験では経験的に仰角閾値 ϕ_{TH} は20度に設定した。

2.4 見通し判定モデルの構築

提案手法では衛星 i のSNR値 s_i に対して、LOSである確率 $p_{LOS}(s_i)$ とNLOSである確率 $p_{NLOS}(s_i)$ を決定する見通し判定モデルを構築する。学習データのうち、LOSの衛星に対してSNRが s となった回数、およびNLOSの衛星に対してSNRが s となった回数をそれぞれ L_s, NL_s とする。LOS, NLOSのサンプル数は異なるため、LOS, NLOSの全サンプル数について L_s, NL_s をそれぞれ正規化する。すなわち、正規化した値を $\tilde{L}_s, \tilde{NL}_s$ とすれば、

$$\tilde{L}_s = \frac{L_s}{\sum_s L_s}$$

$$\tilde{NL}_s = \frac{NL_s}{\sum_s NL_s}$$

である。SNR値 s に対するLOSである確からしき $p_{LOS}(s)$ とNLOSである確からしき $p_{NLOS}(s)$ は以下の式 (2), (3) で定義される。

$$p_{LOS}(s) = \frac{\tilde{L}_s}{\tilde{L}_s + \tilde{NL}_s} \quad (2)$$

$$p_{NLOS}(s) = \frac{\tilde{NL}_s}{\tilde{L}_s + \tilde{NL}_s} \quad (3)$$

なお、一度も観測されなかったSNR値 s について、 $p_{LOS}(s), p_{NLOS}(s)$ は未定義とし、推定には利用しないものとした。この理由は、十分な回数の観測を行っても観測されなかったSNR値は、観測に用いたGPS受信機の特性上、出力されないものと考えられるためである。

本研究では、大阪大学構内で取得した約28万サンプル

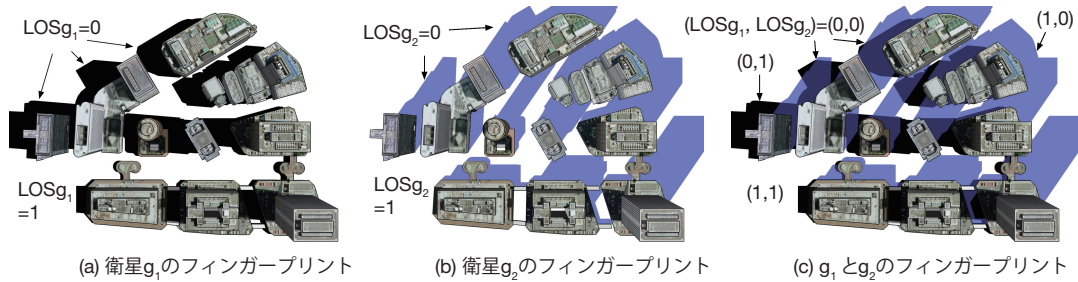


図3 大阪駅周辺のフィンガープリントの例

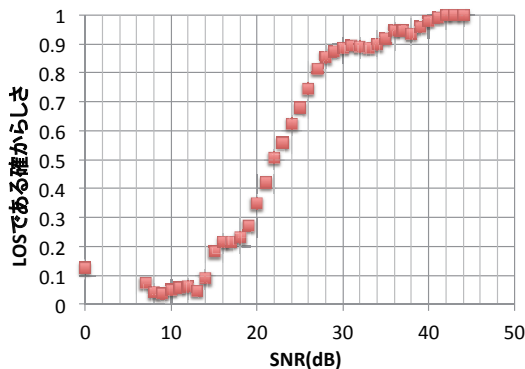


図4 SNR に対する LOS 確率

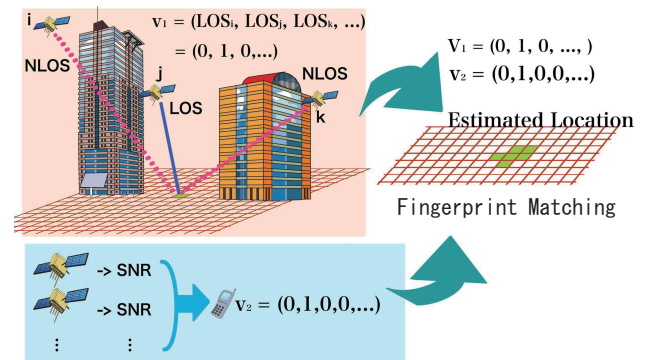


図5 フィンガープリントマッチングの概要

の学習データから見通し判定モデルを構築した。構築した見通し判定モデルを図4に示す。環境による見通し判定モデルの差異などの詳細は文献 [16] を参照されたい。

2.5 端末移動を考慮した存在尤度の更新

端末の移動を考慮するため、時間の経過とともに各セルの存在尤度を更新する。ここで端末の最大移動速度 V_{max} (m/s) は既知であると仮定すれば、 Δt 秒間に端末が移動する最大距離は $V_{max} \cdot \Delta t$ (m) である。したがって、時刻 $t - \Delta t$ に端末がセル c に存在していた場合、現在時刻 t において c から距離 $V_{max} \cdot \Delta t$ (m) 以下に位置するセルのいずれかに端末が存在することになる。

このアイデアに基づき、提案手法では Δt 秒前の存在尤度 $l^{t-\Delta t}(c)$ に対して、以下のように平滑化を行い、端末移動を考慮して更新された時刻 t の存在尤度 $l_M^t(c)$ を得る。

$$l_M^t(c) = l^{t-\Delta t}(c) \frac{w^2}{\pi \cdot V_{max}^2 \cdot \Delta t^2} + \sum_{d \in C_{|c|}} l^{t-\Delta t}(d) \frac{w^2}{\pi \cdot V_{max}^2 \cdot \Delta t^2} \quad (4)$$

ここで $C_{|c|}$ はセル c から距離 $V_{max} \cdot \Delta t$ (m) 以下に位置するセルの集合である。

2.6 フィンガープリントマッチング

フィンガープリントマッチングでは、まず現在時刻 t で得られた各衛星の SNR ベクトル \vec{S} から、見通し判定モデルに基づき各衛星 i の LOS 確率 $p_{LOS}(s_i)$ 、NLOS 確率 $p_{NLOS}(s_i)$ を得る。

衛星数2, SNRベクトル $S = (15, 20)$ のとき

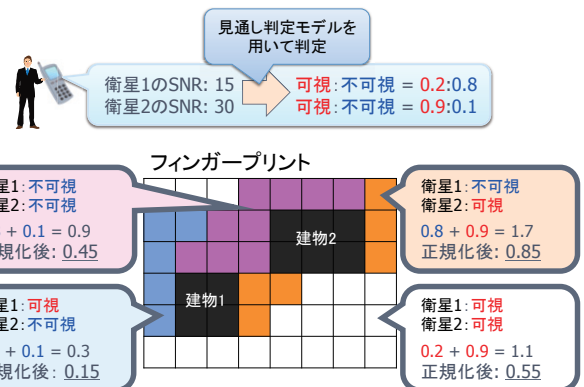


図6 フィンガープリントマッチング

このとき、フィンガープリントとのマッチングにより得られる存在尤度 $l_{FP}^t(c)$ は以下の式によって算出される。

$$l_{FP}^t(c) = \sum_{i=1}^n (p_{LOS}(s_i) \cdot LOS_i(c) + p_{NLOS}(s_i) \cdot LOS_i(c))$$

ここで $LOS_i(c)$ は見通し状況 $LOS_i(c)$ の逆となるバイナリ変数であり、セル c における衛星 i の見通し状況が NLOS のとき 1, LOS のとき 0 となる。以上のようにして算出した存在尤度は、衛星数 n によって最大値が異なるため、衛星数 n で正規化を行い、0~1 の値とする。

図6はフィンガープリントマッチングによる存在尤度の計算例を示している。ユーザが取得した SNR ベクトル $\vec{S} = (15, 30)$ に対し見通し判定モデルを用いて見通し判定ベクトル $\vec{v} = ((0.2, 0.8), (0.9, 0.1))$ を計算する。これを各

フィンガープリント (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) とマッチングを行い正規化するとそれぞれ 0.45, 0.85, 0.15, 0.55 となる。

2.7 フィンガープリント境界通過検知

フィンガープリント境界通過検知では、移動によって衛星の LOS/NLOS が切り替わったこと、すなわちフィンガープリントの境界を通過したことを迅速に検知し、存在尤度に反映する。また、境界通過を検知しなかったという事実も存在尤度に反映させる。

フィンガープリントマッチングから得られる存在尤度の時間的な積み重ねによって境界の通過を検知することもできるが、瞬間ごとの SNR は不安定なことが多いため、高精度かつ迅速に境界の通過を検知することは難しい。そこで、境界通過検知ではフィンガープリントマッチングとは異なり、過去一定期間の SNR に対して見通し判定モデルにより LOS 確率を求め、その統計量を用いることで、境界通過時に特徴的な相対的な SNR の乱れや SNR の急激な変化をとらえる。

フィンガープリントの境界通過を検知するための特徴量として、本研究では 3 種類の方法を考案した。境界通過検知は衛星ごとに行うため、衛星が n 個存在する場合は n 個それぞれについて境界通過検知を行う。SNR s_i は見通しの良い環境下でもノイズの影響により安定した値が得られない。したがってウィンドウサイズ W を設け、 W 分の見通し判定結果に対して統計量を計算する。なお、境界通過検知では衛星の LOS/NLOS の変化に注目するため、ある衛星の見通し状況が LOS でなければ NLOS であり逆も同様である。よってここでは見通し判定結果のうち LOS 確率 p_{LOS} のみを用いる。

以下に本研究で用いる 3 種類の統計量とそれを用いた境界通過検知の方法を示す。

LOS 確率の平均 LOS である確率が 0.5 以上であるときその衛星は LOS であり、0.5 未満であれば NLOS であるという点に着目した方法である。ウィンドウサイズ W 内の LOS 確率 p_{LOS} の平均を求め、0.5 を下回ったとき、もしくは上回ったときに衛星の LOS/NLOS が切り替わったと判断する。0.5 を下回った場合は LOS から NLOS へ、上回った場合は NLOS から LOS へ切り替わったと判定する。

平均 LOS 確率の変化量 LOS/NLOS の切り替わり時には LOS 確率が大きく変動するという点に着目した方法である。ウィンドウサイズ W 内の LOS 確率 p_{LOS} の平均を毎回求め、この平均の変化量が閾値以上となった場合に衛星の見通しが切り替わったと判断する。このとき変化量が負、つまり LOS 確率が下がっているならば、LOS から NLOS 方向へ、逆に変化量が正、つまり LOS である確率が上がっているならば NLOS から LOS 方向へ移動したと判定する。

LOS 確率の分散変化量 LOS/NLOS の切り替わり時には LOS である確率の乱れがより大きくなるという点に着目した手法である。ウィンドウサイズ W 内の LOS である確からしさ p_{LOS} の分散を毎回求め、その分散の変化量が閾値を超えたとき、フィンガープリントの境界を通過したと判断する。この手法では境界通過検知しかできないため、LOS から NLOS への変化であるか、NLOS から LOS への変化であるかについては平均 LOS 確率の変化量を用いた検知と同じ方法を用いて判断する。

2.8 存在尤度の統合

存在領域判定結果は、以下の 3 つの情報源から得られる存在尤度を統合することで行う。

- (1) 過去の存在尤度 $l^{t-1}(c)$ に対して端末の移動を考慮した平滑化を行うことで得られた存在尤度 $l_M^t(c)$
- (2) 時刻 t におけるフィンガープリントマッチングにより得られた存在尤度 $l_{FP}^t(c)$
- (3) 期間 $[t-W, t]$ におけるフィンガープリント境界検知により得られた存在尤度 $l_B^t(c)$

これらの存在尤度の統合は、以下のように重み付き和を行うことで行う。

$$l^t(c) = \alpha \cdot l_M^t(c) + \beta \cdot l_{FP}^t(c) + \gamma \cdot l_B^t(c) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha + \beta + \gamma = 1 (\alpha, \beta, \gamma \geq 0)$ である。

3. 性能評価

3.1 評価方法

フィンガープリント境界通過検知の性能を評価するため、実験を行った。この評価には以下の式で定義される**検知率**、**正解率**、**遅延時間**を用いる。

$$\text{検知率} = \frac{\text{境界通過時の検知回数}}{\text{境界通過回数}}$$

$$\text{正解率} = \frac{\text{正しい境界通過検知回数}}{\text{境界通過検知回数}}$$

$$\text{遅延時間} = \text{境界通過検知時刻} - \text{境界通過時刻}$$

遅延時間の評価においてはフィンガープリントの境界通過を正しく検知できたサンプルのみで行う。

3.2 評価環境

フィンガープリント境界通過検知法の評価を行うため、大阪大学情報科学研究棟周辺にて実験を行った。対象環境の三次元モデルは建物の設計図を元に作成し、見通し判定モデルは 2.4 節の図 4 に示した大阪大学モデルを用いた。

フィンガープリントの境界を通過するように図 7 の線で示した経路を 7 往復しサンプルを取得した。サンプルの取得には Nexus S を 10 台用いてサンプリングレート 1Hz でサンプルの記録を行い計 140 サンプルを得た。実験時

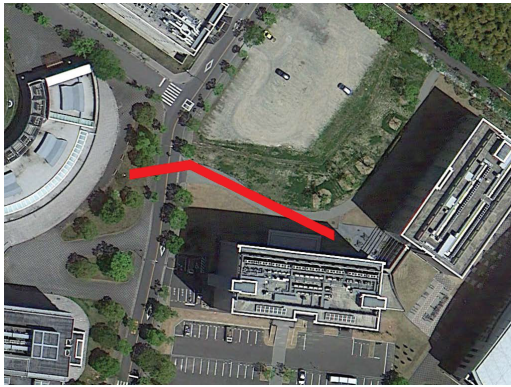


図 7 実験環境

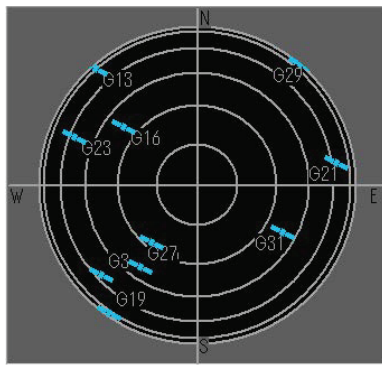


図 8 実験時の GPS 衛星配置

の GPS 衛星の配置は図 8 に示す通りであり、このうち図 7 の経路を移動することで LOS/NLOS が変化する衛星は PRN 番号 3 と 19 であった。そこでこの 2 つの衛星のみに着目し、フィンガープリント境界通過検知について 2.7 節に示した 3 種類の統計量を用いたそれぞれの方法の評価を行った。

3.3 結果

図 9, 図 10, 図 11 は LOS 確率の平均を用いた検知率, 正解率, 遅延時間を表している。LOS 確率の平均を用いた場合は 0.5 を境界通過検知の閾値としている。グラフの横軸はウィンドウサイズ W である。LOS 確率の平均による方式ではウィンドウサイズを変化させても検知率はあまり変化なく, 97% という非常に高い検知率を達成していることがわかる。これはフィンガープリントの境界付近にいた時間が短く LOS/NLOS の確からしさに曖昧さがなかったためと考えられる。正解率も約 90% 以上という高い精度を示しており, ウィンドウサイズを増加させるとさらに高くなっている。これはウィンドウサイズを増加させると雑音に対してより寛容となるためであると考えられる。一方, 遅延時間はウィンドウサイズの増加とともに増加している。これは境界通過による LOS 確率の変化が平均化され, 迅速な反応ができなくなってしまうからである。

図 12, 図 13, 図 14 は境界通過検知に平均 LOS 確率の変化量を用いた場合の検知率, 正解率, 遅延時間を表して

いる。変化量の閾値である差分閾値を低くすると検知率は 100% となるが, 正解率は低くなる。逆に閾値を高くすると検知率は下がるが正解率は高くなる。閾値を高く設定することで, 変化が大きく変わったもののみを検出するようになり緩やかに変化するのは検知しなくなるため検知率が下がるが, 雑音による変化に強くなるため正解率が上がると考えられる。また同じ閾値でもウィンドウサイズの増加により検知率は下がるが正解率が上がる理由はウィンドウサイズの増加に伴い雑音に強くなるためであり, 先ほどと同じ理由であると考えられる。一方, 遅延時間は閾値を変化させてもあまり変化なく, 平均して 2 秒以下で検知することができる。これはフィンガープリントの境界を通過したときは同じ時間内で LOS 確率が大きく変化するためであると考えられる。ただしウィンドウサイズが大きく閾値が高い場合は境界通過時の平均 LOS 確率の変化が平均化されるため遅延時間も大きくなっている。

図 15, 図 16, 図 17 は境界通過検知に LOS 確率の分散変化量を用いた場合の検知率, 正解率, 遅延時間を表している。分散の閾値を高くしていくと検知率は大きく下がる。しかし正解率は低い閾値でも 100% に近い。これはフィンガープリントの境界を通過した時に LOS 確率の分散変化量が大きくなり, 見通し状況が変わらないときは分散がほとんど無くなるためと考えられる。また, 分散を用いると遅延時間も平均 1 秒ほどで検知できることがわかる。これは平均 LOS 確率の変化量を用いた場合と同様に, フィンガープリントの境界を通過した時は同じ時間内で LOS 確率が大きく乱れるからと考えられる。

以上より, 最もシンプルに LOS 確率の平均を用いた場合でも検知率, 正解率ともに高い精度を出せるが, ウィンドウサイズとともに遅延時間も大きくなる。例えばウィンドウサイズ $W = 5$ を選ぶと検知率は 97%, 正解率は 95%, 遅延時間は 3.5 秒となる。一方, 平均 LOS 確率の変化量や LOS 確率の分散では検知率は低下するが高い正解率かつ迅速な検知を行うことができる。例えば変化量を用いた手法ではウィンドウサイズ $W = 6$, 差分閾値に 0.08 を選ぶと検知率は 84%, 正解率は 98%, 遅延時間は 1.9 秒となる。LOS 確率の分散を用いた手法ではウィンドウサイズ $W = 7$, 分散閾値に 0.05 を選ぶと検知率は 89%, 正解率は 95%, 遅延時間は 1.7 秒となる。以上の結果から, 多少の遅延時間と正解率が低下しても良い場合は最もシンプルな LOS 確率の平均を用いれば良い。逆に迅速な検知が必要な場合や検知率が低下してでも確実に検知が正解して欲しい場合は平均 LOS 確率の変化量を用いれば良い。

4. まとめ

本研究では都市部における GPS を用いた高信頼な端末の存在位置推定を目標に, 都市部の 3 次元モデルを利用した手法を提案した。提案手法では, 各地点において各衛星

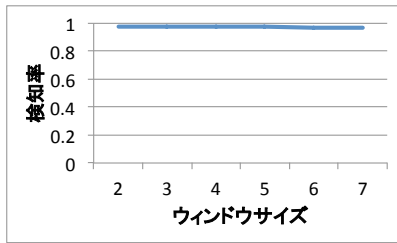


図 9 検知率 (LOS 確率の平均)

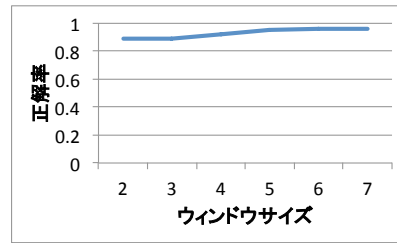


図 10 正解率 (LOS 確率の平均)

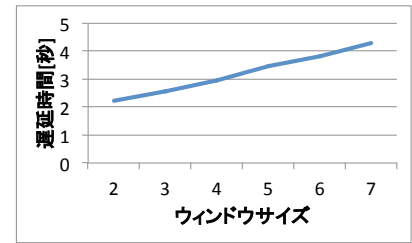


図 11 遅延時間 (LOS 確率の平均)

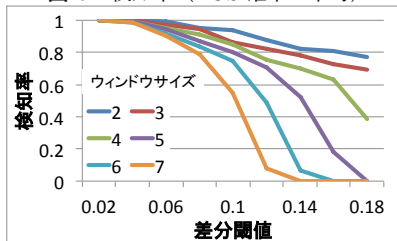


図 12 検知率 (平均 LOS 確率の変化量)

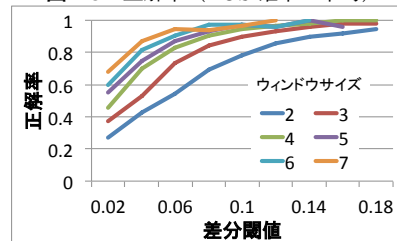


図 13 正解率 (平均 LOS 確率の変化量)

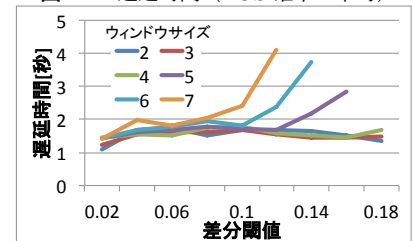


図 14 遅延時間 (平均 LOS 確率の変化量)

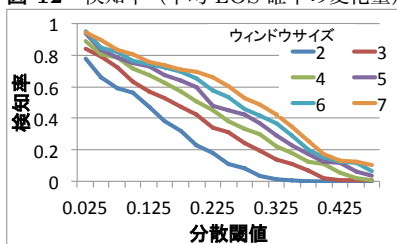


図 15 検知率 (LOS 確率の分散)

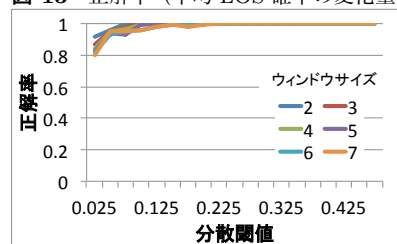


図 16 正解率 (LOS 確率の分散)

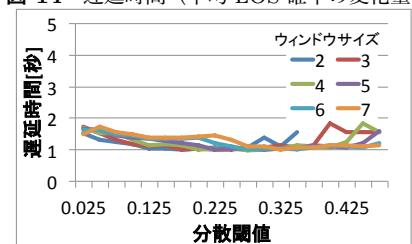


図 17 遅延時間 (LOS 確率の分散)

が LOS であるか NLOS であるかを事前に計算し、フィンガープリントとする。携帯端末が受信した GPS の SNR から LOS/NLOS を学習データに基づき判定し、その判定結果とフィンガープリントに応じて各地点の存在尤度を決定する。また、フィンガープリントの境界付近において安定した結果が得られるように、短期間の SNR 分布から端末の移動に伴う LOS/NLOS の切り替わりを検知し、フィンガープリントの境界を通過した場合に切り替わり後の地点の存在尤度を一時的に高めることで、安定した結果が得られるようにする。

フィンガープリントの境界通過検知について実験を行った結果、検知率、正解率はともに高いことがわかり、シンプルな平均を用いた場合は検知率は 97%、正解率は 95%、遅延時間は 3.5 秒、変化量を用いた場合は検知率は 84%、正解率は 98%、遅延時間は 1.9 秒であった。

今後の課題として、提案手法を他の位置推定法と組み合わせることでより高信頼な端末の存在位置推定を目指す。また都市部に限らず多様な環境にて評価を行うことで、環境の違いによる影響の差異の考察についても検討している。

参考文献

[1] Google.com: GoogleMap, <http://maps.google.com/>. Accessed: 2014-02-06.
 [2] foursquare: foursquare, <https://ja.foursquare.com/>. Accessed: 2014-02-06.
 [3] Ubusuna.inc, Eponet, Casareal and TechMatrix: omote

navi, <http://omotenavi.jp/index.html>. Accessed: 2014-02-06.

[4] Modsching, M., Kramer, R. and ten Hagen, K.: Field Trial on GPS Accuracy in a Medium Size City: The Influence of Built-up, *Proceedings of Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp. 209–218 (2006).
 [5] 坂井文泰: GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, 1st edition (2003).
 [6] Soloviev, A. and Dickman, J.: Extended GPS Carrier Phase Availability Indoors With A Deeply Integrated Receiver Architecture, *IEEE Wireless Communications Magazine*, Vol. 18, No. 2, pp. 36–44 (2011).
 [7] Kawano, I., Mokuno, M., Kogure, S. and Kishimoto, M.: Japanese Experimental GPS Augmentation using Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, pp. 175–181 (2004).
 [8] Rekimoto, J., Miyaki, T. and Ishizawa, T.: LifeTag: WiFi-based Continuous Location Logging for Life Pattern Analysis, *Proceedings of International Symposium on Location- and Context-Awareness (LOCA2007)*, pp. 35–49 (2007).
 [9] Agarwal, A. and Das, S. R.: Dead Reckoning in Mobile Ad Hoc Networks, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003)*, pp. 1838–1843 (2003).
 [10] Kim, S. and Kim, J.-H.: Adaptive Fuzzy-Network-Based C-Measure Map-Matching Algorithm for Car Navigation System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 2, pp. 432–441 (2001).
 [11] Arikawa, M., Konomi, S. and Ohnishi, K.: Navitime: Supporting Pedestrian Navigation in the Real World,

- Journal of IEEE Pervasive Computing*, Vol. 6, No. 3, pp. 21–29 (2007).
- [12] Beauregard, S., Widyawan and Klepal, M.: Indoor PDR Performance Enhancement Using Minimal Map Information and Particle Filters, *Proceedings of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium 2008 (PLANS 2008)*, pp. 141–147 (2008).
- [13] 内山彰, 勝田悦子, 上嶋祐紀, 山口弘純, 東野輝夫: 都市区画における GPS 衛星の見通し判定を用いた位置精度向上法の提案, *情報処理学会論文誌*, Vol. 55, No. 1, pp. 389–398 (2014).
- [14] Trimble: Trimble 3D Warehouse, <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>. Accessed: 2014-02-06.
- [15] Glassner, A. S.(ed.): *An Introduction to Ray Tracing*, Academic Press, 1st edition (1989).
- [16] 上嶋祐紀, 内山彰, 山口弘純, 東野輝夫: GPS 衛星見通し判定を用いた位置推定法の地域特性に基づく精度向上の検討, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2013-MBL-69, No. 4, pp. 1–6 (2013).