

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

内山 彰^{1,a)} 勝田 悦子¹ 上嶋 祐紀¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

受付日 2013年4月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: GPS は多くの携帯端末に搭載され, 我々の生活に欠かせないものとなっているが, 都市部においてはビルなどの障害物による遮蔽や反射・回折の影響を受け, 測位誤差が大きくなることが知られている. そこで本研究では GPS の見通し状況と建物の 3 次元モデルを利用した位置精度向上法を提案する. 提案手法では建物の形状や配置により, 各 GPS 衛星の見通し状況が地点ごとに決まることに着目する. 衛星の見通し状況は, スマートフォンなどで一般に取得可能な GPS 信号の Signal to Noise Ratio に基づき推定する. 建物の 3 次元モデルに基づき, 衛星の見通し状況を各地点において事前に計算しておき, フィンガープリントを構築する. 構築したフィンガープリントと, GPS の受信状況から判定した見通し状況とのマッチングを行うことで存在領域を絞り込み, 位置精度向上を図る. 大阪駅周辺で取得した GPS ログを用いて提案手法の性能を評価した結果, 平均正解率 81% で GPS 測位結果の誤差範囲に対して 17% 相当の領域に絞り込みが可能となった.

キーワード: グローバル・ポジショニング・システム, フィンガープリント, 位置精度向上, 見通し判定

Location Accuracy Enhancement Using GPS Line-of-sight Detection in City Sections

AKIRA UCHIYAMA^{1,a)} ETSUKO KATSUDA¹ YUKI UEJIMA¹
HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹

Received: April 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: In recent years, many mobile phones are equipped with GPS, which is essential for our daily life. It is well known that GPS error increases in urban areas due to multipath and shadowing caused by buildings. In this research, we propose a method to enhance location accuracy using GPS Line-Of-Sight (LOS) detection. We exploit the facts that shapes and layouts of surrounding buildings change depending on positions, and that GPS signal status changes depending on locations of GPS satellites and a GPS receiver, and its surrounding buildings. The proposed method builds fingerprints of GPS LOS status for each position based on a 3D building model. Location accuracy enhancement is performed by fingerprint matching of estimated GPS LOS status. The performance evaluation using a real data set obtained around Osaka station shows that the proposed method can narrow down GPS estimated regions to 17% with the success ratio of 81%.

Keywords: global positioning system, fingerprinting, location accuracy enhancement, Line-Of-Sight detection

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], [2]. 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. なかでも 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. GPS による測位では, 携帯

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

^{a)} utiyama@ist.osaka-u.ac.jp

電話などの GPS 受信機が GPS 衛星から送信されたタイムスタンプ付きの信号を受信し、受信時刻との差 (Time Of Arrival: TOA) によって擬似距離を算出する。GPS 衛星の位置は軌道情報として GPS 信号に含まれるため、4 つ以上の GPS 衛星からの擬似距離が推定できれば、それに基づき GPS 受信機の位置を推定可能である。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。一方で、多くの高層ビルが存在する都市部や屋内では 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復号ができなくなったりする場合がある [3]。

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 [4] 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 [5] 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 [6] 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 [7] 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。そのほかにも加速度センサや電子コンパスを用いた自律航法 [8] 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 [9], [10], [11] 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、都市環境でつね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要となる。

そこで本研究では都市部における GPS を用いた測位精度の向上を目標に、都市部の 3 次元モデルを利用した手法を提案する。前述のように都市部では建物による遮蔽のために直接波を受信可能な衛星数が減少し、測位精度が低下する。しかし逆にこの欠点を利用して、建物の形状と配置が分かれば、どの地点なら特定の位置にある GPS 衛星からの信号を直接受信できるかを見通し計算により求めておくことができる。以降では、直接波が受信可能であることを LOS (Line-Of-Sight)、そうでないことを

NLOS (None-Line-Of-Sight) と記述する。提案手法では GPS の受信状況から各衛星が LOS/NLOS のどちらであるかを推定し、事前に求めておいた地点ごとの LOS/NLOS 状況 (フィンガープリント) と照らし合わせ、LOS/NLOS 状況が最も近い地点に端末が存在していると見なす。GPS 衛星の見通し状況はスマートフォンなどに搭載されている GPS チップで一般に取得可能な Signal to Noise Ratio (SNR) に基づき推定する。

測距を行うためのものである GPS 信号を見通し状況という別の観点から利用するという点において、提案手法はこれまでにないアプローチである。都市部では GPS の見通し状況が周辺環境や衛星配置によって頻繁に変化するため、本アプローチは現在位置の絞り込みに有効と考えられる。特に、測距では信号が受信できなければ情報が得られないが、提案手法では信号が受信できなかったという事実も位置を絞り込むための情報として利用可能である。我々の知る限りでは唯一、同様に衛星の見通し状況を利用して存在範囲を絞り込む手法が Groves により提案されている [12]。この手法では道路の幅方向に端から端までとった線分というごく狭い 1 次元の範囲を対象としており、衛星の見通し状況を具体的に判定する方法の考案や実環境での性能評価は行われていない。これに対して提案手法では 2 次元平面を対象として、実測に基づく見通し状況判定モデルの構築や性能評価を行っている。さらに提案手法は、ユーザの問合せに応じてフィンガープリントのマッチング結果を返すクラウドサービスとしての実装も可能である。したがって、スマートフォンなど既存の GPS 受信機に対して低コストで新しい付加価値を与えられるというメリットがある。

提案手法の性能を評価するため、JR 大阪駅ビル周辺を対象にフィンガープリントマップを構築し、Nexus S を用いて実際に取得した GPS ログに基づき実証実験を行った。評価結果から、平均正解率 81% で GPS 測位結果の誤差範囲に対して 17% 相当の領域に絞り込みが可能であった。

2. 関連研究

2.1 GPS 精度向上に向けた取り組み

GPS 測位には衛星の軌道情報が必要である。衛星の軌道情報は GPS からの信号に含まれているが、すべての軌道情報を得るためには約 12 分間が必要である。したがって、通常の GPS では最初の測位に時間がかかるという問題がある。この問題を解決するために A-GPS (Assisted GPS) [13] が考案された。A-GPS は多くの携帯電話でも採用されている方式であり [14]、全衛星の軌道情報をサーバに蓄積しておき、受信機は携帯通信網などを介してサーバから衛星の軌道情報を取得するため、迅速に測位を開始することができる。また、精度向上のため D-GPS (Differential

GPS) [15] も利用されている。D-GPS では電離層などの大気の揺らぎによって生じる GPS 信号の伝搬遅延は、近隣の受信機で同じように現れるという特徴を利用する。地理的に分散配置された基地局など正確な位置が分かる地点で GPS 信号の伝搬遅延を推定し、近隣の GPS 受信機が測位を行う際に推定された伝搬遅延情報を用いることで精度向上を図る。

さらに利用可能な衛星数を増やして都市部における位置推定精度を向上させる研究開発も行われている。日本では 2010 年 9 月に準天頂衛星システム (QZSS) 計画 [6] により、「みちびき」と呼ばれる準天頂衛星が打ち上げられた。同様の取り組みは世界的に進められており、欧州の Galileo、中国の北斗などが存在する。提案手法では衛星数が増えるほどフィンガープリントの粒度が細くなる。したがって、新たな GPS 衛星が打ち上げられ利用可能になれば、通常の GPS 測位による精度向上に加えて提案手法によってさらに精度を高めることができる。

文献 [16] では、都市部の 3 次元モデルに基づき反射や回折を考慮した GPS 電波伝搬モデルを構築している。これによってマルチパス信号を含めた各地点での GPS 信号受信状況をシミュレートし、マルチパス信号を除外することができると仮定した場合に、都市部でも誤差数 m の測位精度が達成できることを示している。マルチパス信号を除外することは測距精度の低い信号を除外することに等しいため、文献 [16] は測距精度を高めることによる測位精度向上の可能性を示している。一方、提案手法は GPS 信号の見通し状況を利用した位置精度の向上を目的としており、見通し通信ができないという情報もユーザ端末の存在領域の推定に利用しているという点で本質的に異なる。また、衛星数が不十分で測位ができない場合でも、提案手法は存在領域の特定が可能であり、WiFi など他の位置推定法と組み合わせて利用することができる。

2.2 GPS 受信機の改良による精度向上

文献 [17], [18] では最新の高感度 GPS 受信機を利用して様々な建物内における測位状況を調査している。この調査によると、屋内でも木製の建物であれば数 m の誤差で測位が可能であり、鉄筋コンクリート製の建物でも 2 層までであれば場所によっては 10m 程度の誤差で測位可能であることが明らかになっている。

一方、GPS 衛星からの信号に加えて、加速度センサから得られる情報や地図情報などの新たな情報を併用することで、位置精度向上を目指す手法も考案されている。文献 [5] では GPS 端末を改良して加速度センサなどと組み合わせることで、衛星の搬送波の位相差を検出して直接波と反射・回折波を区別する。そこから電波の到達時刻誤差を推定することで反射・回折による誤差を改善することを目指している。

2.3 GPS 非依存の位置推定方式

GPS に依存しない位置推定方式も考案されている。文献 [19] では屋内に設置した基地局からの電波強度をあらかじめ各地点で記録して電波強度マップを作成し、実際に端末が受信した電波強度と電波強度マップを比較することで位置推定を行う。文献 [8] ではスマートフォンなどに搭載されている加速度センサや電子コンパスを利用した Dead Reckoning (DR) を利用している。DR では加速度センサで取得した加速度情報から人の歩行を検出して歩数を計算し、歩幅と組み合わせることで移動距離を取得する。さらに電子コンパスにより取得した移動方向と組み合わせることで、始点からの相対位置が推定できる。

また、精度の低い位置情報に地図情報を組み合わせ、マップマッチングにより位置を補正する方式も存在する。マップマッチングは主に自動車を対象としており、カーナビゲーションシステムなどで実用化されている [9]。歩行者を対象としたマップマッチングを行う手法 [10], [11] も提案されている。これらの手法は提案手法と組み合わせることもでき、これによって現在位置の範囲をさらに絞り込むことが可能である。

3. GPS の見通し状況を用いた位置精度向上法

3.1 提案手法の概要

提案手法では GPS によりおおよその測位結果が得られるものと仮定し、フィンガープリントと GPS の見通し状況のマッチングにより位置精度の向上を図る。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よいし、ユーザ端末が保持し、ローカルにマッチング処理を行ってもよい。まず、ユーザは測位結果 \tilde{l} と受信した GPS 衛星 $1, 2, \dots, n$ の SNR を表すベクトル $\vec{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ を記録する。次に、SNR ベクトル \vec{S} から各衛星 i の見通し状況 LOS_i を判定し、見通し状況ベクトル \vec{v} を得る。見通し状況 LOS_i は衛星 i が 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。

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

SNR に基づき見通し状況を判定する方法は 3.2 節で述べる。

図 1 に示すように、提案手法では対象領域のビルの高さや配置を再現した 3 次元モデルに基づき、地点 c における見通し状況ベクトル \vec{v}_c を事前に計算しておく。事前に計算した見通し状況ベクトルのうち、GPS の受信状態から判定した見通し状況ベクトル \vec{v} に最も近いものが \vec{v}_c であるとき、ユーザ端末の現在位置は地点 c であると考えられる。しかし、衛星の見通し状況は周辺の建物の配置および高さによって決まるため、そのような地点 c は一般に複数存在する。そこで本論文では、GPS 測位結果 \tilde{l} を中心とした誤

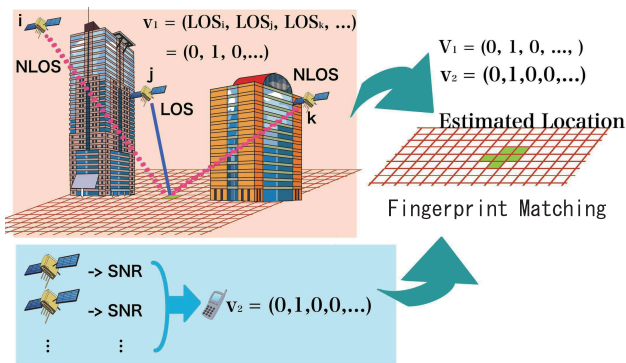


図 1 提案手法の概要

Fig. 1 Overview of location accuracy enhancement.

差円の範囲内に存在する領域を推定対象領域とし、GPS 測位で得られた存在可能性のある領域の絞り込みを図るものとするが、WiFi フィンガープリントや携帯電話基地局からの電波強度を利用した測位結果などと併用することで、ユーザ端末が存在する可能性のある領域を絞り込むことも可能である。

3.2 SNR に基づく衛星の見通し状況判定

通常の GPS 測位は信号伝搬時間に基づき各衛星から受信機までの距離を算出することによって行う。しかし、都市部ではビルなどの障害物が存在するため、反射や回折によって各衛星からの距離計算に大きな誤差が生じやすい。また、測位に利用可能な衛星の方向が偏りやすいため、測位ができたとしても誤差が大きくなる傾向にある。そこで、提案手法では GPS の見通し状況をフィンガープリントとして利用することで測位精度の向上を図る。

GPS の受信状態をフィンガープリントとして用いる場合、直感的には WiFi のフィンガープリントと同様に電波強度を利用する方法が考えられる。しかし、GPS の信号強度は約 -130 dBm と非常に弱く、WiFi や Bluetooth の信号強度の 100 万分の 1 しかないうえに、自然界に存在する雑音よりも弱い [20]。このため、雑音の影響を受けやすく WiFi フィンガープリントのように電波強度を利用することが難しい。また、そもそも携帯電話内蔵の GPS チップなど、一般に普及している GPS 受信機では測位計算処理がモジュール化されており、受信電波強度を得ることができない。このため、GPS においては電波強度を利用した測位は困難である。代わりに一般的な GPS チップからは GPS 受信状態として SNR が得られるようになっており、各衛星の SNR は NMEA と呼ばれるフォーマットに従ってモジュールから出力される。GPS は変調方式に CDMA を用いており、受信機で逆拡散を行ったうえでさらに信号を重ね合わせることでランダムノイズを除去し、復号を行っている [20]。SNR は復号後の信号対雑音比であるため、信号の品質を表す。

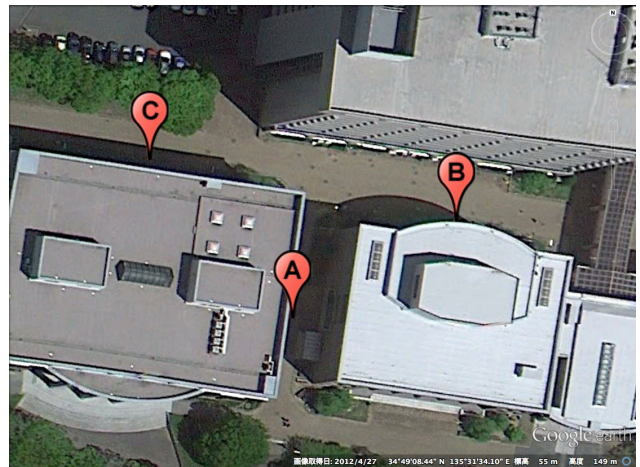


図 2 モデルデータ測定地点

Fig. 2 Sampling points for LOS/NLOS model.

衛星の見通し状況ではなく SNR によりフィンガープリントを構築することも考えられるが、事前にすべての地点であらゆる衛星配置に対する SNR を計測・記録しておくことは、労力が非常に大きいため困難である。この解決策として、シミュレーションによりフィンガープリントを構築することが考えられる。しかしながら、前述のように GPS 信号の電波強度が非常に微弱であるため、反射や回折だけでなく、熱雑音や受信機内ノイズなどわずかな雑音の影響も考慮する必要があり、SNR をシミュレーションにより計算することは難しい。

このため、提案手法では見通し状況のみに着目してフィンガープリントを構築する。この理由は、雑音が分からなかったとしても、直接波を受信できる場合とそうでない場合で大きな電波強度の差が生じるため、ほとんどの場合で SNR にも大きな差が生じるからである。したがって、LOS と NLOS を区別可能な SNR の範囲を求めることができれば、直接波のみを考慮して構築したフィンガープリントとのマッチングが可能となる。提案手法では、実際に都市部で測定したデータに基づき、そのような LOS と NLOS を区別可能な SNR の範囲を決定する。フィンガープリントの構築では、各地点 c 、各衛星位置 p について、 c 、 p 間に障害物が存在するかどうかを計算しておくだけでよく、都市の 3 次元モデルとレイトレーシング法 [21] などを用いることで容易に計算が可能である。都市の 3 次元モデルは Trimble 3D Warehouse [22] で公開されている建物の 3 次元モデルなどが利用できる。

LOS、NLOS の区別が可能な SNR の範囲を求めるため、図 2 に示す大阪大学吹田キャンパス医学部周辺で空の開けた方向が異なる 3 地点で Nexus S を台の上に補助バッテリーと接続して固定し、サンプリングレート 1 Hz で約 26 時間継続して各衛星の SNR を記録した。図 3 は各地点で魚眼レンズにより撮影した天空写真であり、測定環境は 4 階～11 階建てのビルが周辺に存在するため、測定地点に



図 3 モデルデータ測定地点の全天写真

Fig. 3 Hemispherical photos at sampling points for LOS/NLOS model.

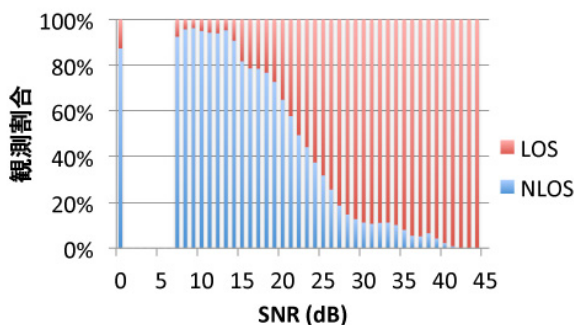


図 4 LOS/NLOS による観測 SNR 構成比

Fig. 4 Measured SNR component ratios by LOS and NLOS satellites.

よって空の開けている方向が異なっている。各測定地点における衛星の LOS/NLOS を正しく決定するため、三脚に固定したレーザ距離計 Leica DISTO X310 を用いて各測定地点から周辺構造物までの距離および角度を測定し、魚眼レンズにより撮影した全天写真と組み合わせることで、LOS/NLOS の範囲を決定した。使用したレーザ距離計の距離誤差は ± 1 mm、角度誤差 ± 0.2 度である。さらに測定誤差の影響により LOS/NLOS の範囲を誤らないようにするため、算出した LOS/NLOS の境界について仰角、方位角ともに ± 2 度の範囲のサンプルを除外した。また、低仰角の衛星は歩行者や遠方の構造物の影響を受けやすく、正しい LOS/NLOS 判定ができない可能性が高いため、仰角 20 度未満のサンプルも除外した。以上のようにして一部のサンプルを除外した結果、得られたサンプル数は LOS が約 42.2 万、NLOS が約 85.3 万であった。測定地点はいずれも障害物が多いため、NLOS のサンプル数が LOS の約 2 倍存在している。サンプル数の偏りが見通し状況判定モデルに影響しないようにするため、判定モデルの構築では LOS, NLOS それぞれの分布について SNR 値が観測された回数を正規化し、その値をモデル構築に用いる。

図 4 は得られたサンプルを正規化した後、観測 SNR 値ごとに LOS/NLOS 構成比を示したものである。この結果から、LOS の場合と NLOS の場合で SNR の分布は異なり、SNR が高いほど LOS、低いほど NLOS であることが分かる。特に SNR が 0 の場合は約 90% が NLOS である一方で、LOS の場合でも SNR 値 0 が観測される場合がある。これは、端末付近に車のような障害物が置かれるなど、一

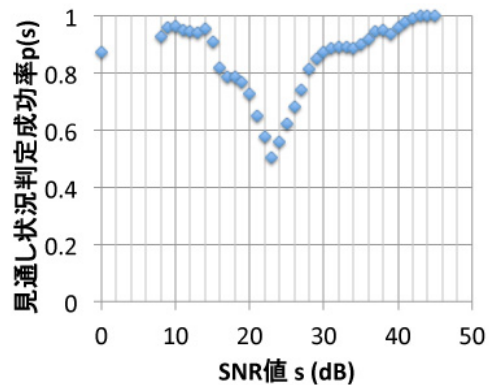


図 5 SNR に対する見通し状況判定成功率

Fig. 5 SNR vs. success probability of LOS estimation.

時的な NLOS が発生したためと考えられる。また、NLOS でも反射や回折の影響により SNR が 30~40 dB になる場合があるが、その頻度は 13% 未満である。SNR 値 43 dB 以上は LOS の場合でのみ観測された。

この結果から、提案手法では衛星の SNR 値 s に対して、見通し状況 $v(s)$ とその確かさ (判定成功率) $p(s)$ を決定する判定モデルを構築する。そのうえで、判定成功率が閾値 p_{TH} 以上となるような SNR 値は、LOS/NLOS の区別が可能と見なし、フィンガープリントとのマッチングに利用する。受信したサンプルの SNR 値が s となった回数について、LOS, NLOS それぞれで正規化を行った値を L_s, NL_s とすると、 $v(s), p(s)$ は以下の式 (1), (2) で定義される。

$$v(s) = \begin{cases} 1 & (\text{if } L_s \geq NL_s) \\ 0 & (\text{if } L_s < NL_s) \end{cases} \quad (1)$$

$$p(s) = \max \left\{ \frac{L_s}{L_s + NL_s}, \frac{NL_s}{L_s + NL_s} \right\} \quad (2)$$

なお、1 度も観測されなかった SNR 値 s について、 $p(s)$ 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 受信機の実用上、出力されないものと考えられるためである。実際に大阪大学吹田キャンパス医学部周辺で取得したサンプルを用いて構築した判定モデル $p(s)$ を図 5 に示す。

構築した判定モデルは地域によらず利用可能であるが、地域によって大気圏の状態や気候などの環境条件が異なるため、地域ごとに観測を行い、モデルを修正することで精度は向上すると考えられる。また、端末の保持状態によって一時的なアンテナの向きが変化したり、人体が SNR に影響したりすることも考えられる。本論文では GPS の見通し状況を利用した位置精度向上の基本性能を示すため、このような影響までは考慮していないが、文献 [23] のようにスマートフォンに搭載されているセンサを利用して端末の保持状態を推定したり、基準局を設置して地域ごとの補

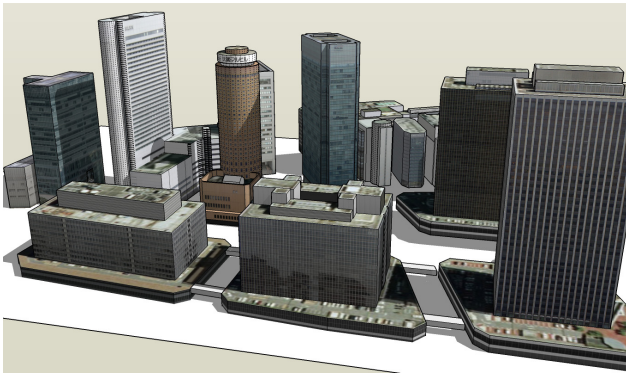


図 6 大阪駅周辺の 3次元モデル

Fig. 6 3D model of Osaka station area.

正情報を配信したりする方法により、適応的にモデルを修正し、精度を向上させることは可能である。

3.3 フィンガープリントの構築

フィンガープリントは建物情報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。本研究では JR 大阪駅周辺を対象とし、Trimble 3D Warehouse [22] で公開されている建物の 3次元モデルを用いた。

図 6 は JR 大阪駅前周辺のビル群を 3次元モデルで表したものである。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ときの光（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 [21] 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 1度だけ実行すればよく、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。

以下にフィンガープリントの構築例を示す。図 7、図 8 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。 g_1 、 g_2 の見通し状況を重ねることで、図 9 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位置における見通し状況ベクトル $\vec{v} = (LOS_{g_1}, LOS_{g_2})$ 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。したがって 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

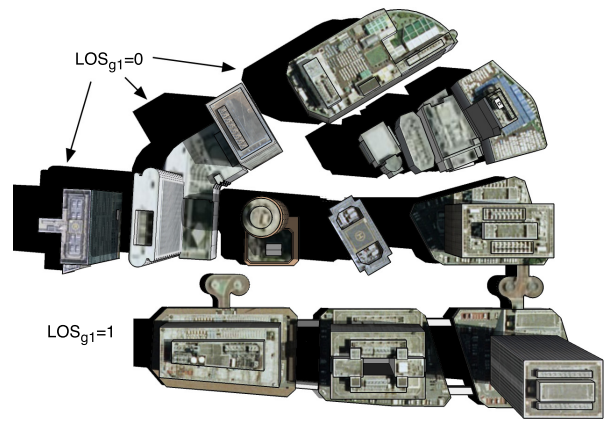


図 7 衛星 g_1 のフィンガープリント

Fig. 7 Fingerprint of satellite g_1 .

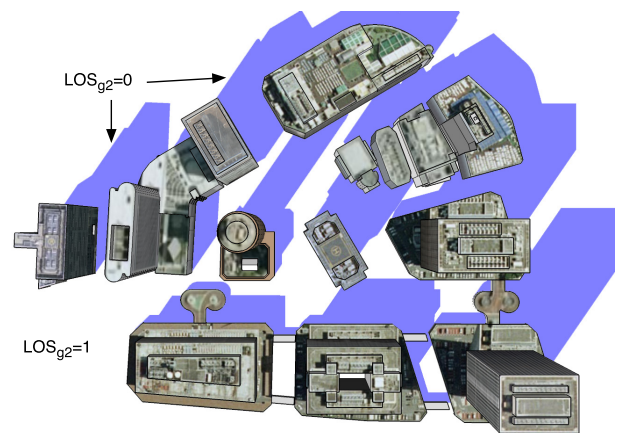


図 8 衛星 g_2 のフィンガープリント

Fig. 8 Fingerprint of satellite g_2 .

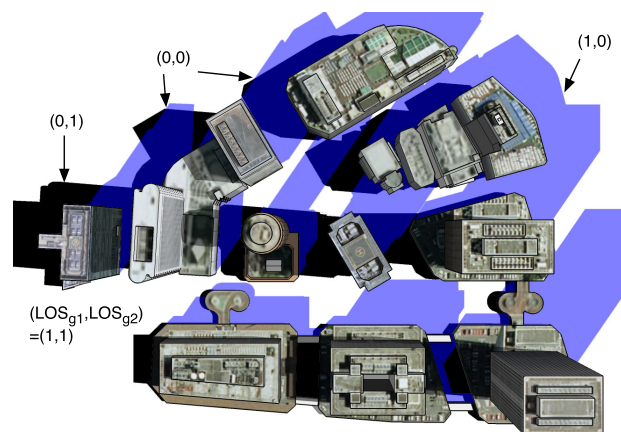


図 9 衛星 g_1 と g_2 のフィンガープリント

Fig. 9 Fingerprint of satellites g_1 and g_2 .

に仰角閾値 ϕ_{TH} は 20 度に設定した。

3.4 フィンガープリントとのマッチング

見通し判定成功率が p_{TH} 以上である衛星数を n とすれば、見通し状況 \vec{v} は n 次元のベクトルである。領域 r におけるフィンガープリントを \vec{v}_r とすれば、 \vec{v} とフィンガーブ

プリントとのマッチングは、 \vec{v} に含まれる衛星のみを対象としたハミング距離 $H(\vec{v}, \vec{v}_r)$ が最小となるような領域 r を決定することにより行われる。

すなわち、判定モデルの式 (1) により得られる見通し状況の推定結果を

$$\vec{v} = (LOS_1, LOS_2, \dots, LOS_n)$$

とすれば、ハミング距離 $H(\vec{v}, \vec{v}_r)$ は以下の式によって計算される。

$$H(\vec{v}, \vec{v}_r) = \sum_{i=1}^n LOS_i \oplus LOS_{r,i}$$

このとき、取得した見通し状況 \vec{v} とフィンガープリントのマッチングは、全セルのフィンガープリント集合を FP とすれば、以下のようにハミング距離最小となる領域 r を特定することで行う。

$$\arg \min_{r \in FP} H(\vec{v}, \vec{v}_r) \quad (3)$$

以降では、上記式で決定された領域 r と実位置 t とのハミング距離 $H(\vec{v}_r, \vec{v}_t)$ が許容ハミング距離 M_h 以下であるとき、推定結果は正しいと呼ぶ。提案手法の目標は、できるだけ小さく、かつ正しい推定結果を得ることである。式 (3) を満たす領域 r は一般に複数存在するため、3.1 節で述べたように、本論文では GPS 測位結果 \vec{l} を中心とした誤差円の範囲内の領域 D について、推定した領域 r の共通領域 $D \cap r$ を推定結果とする。

4. 性能評価

4.1 評価環境

提案手法の性能を評価するため、性能解析および大阪駅前ビル周辺を対象として Nexus S を用いた実験を行った。対象環境の 3 次元モデルは 3.3 節で示したモデルを用いた。また、見通し判定モデルは 3.2 節の図 5 に示したモデルを用いた。

性能解析では、見通し判定モデルによる見通し状況判定の成功率 p が全衛星について均一であると仮定したうえで、正しい推定結果が得られる割合を算出する。また実機実験では、図 10 に A から D の記号で示した大阪駅前ビル周辺の 4 地点において、Nexus S を用いて 25 サンプルずつ取得した NMEA 形式の GPS ログデータにより評価を行った。測位に十分な GPS 衛星の軌道情報が得られるよう、各地点のサンプル取得時には GPS を受信状態にしてから約 15 分間のログをサンプリングレート 1 Hz で記録した。なお、一定期間のログを記録している理由は GPS の測位誤差をできるだけ抑えるためであり、提案手法自体は衛星の軌道情報をネットワーク経由でサーバから取得すれば数秒間の観測で瞬時に利用可能である。性能評価には、記録したログのうち全衛星の軌道情報の取得が確認できた時間以降の

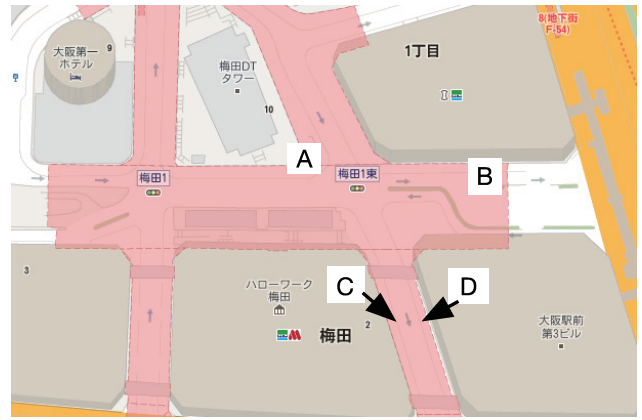


図 10 実験環境

Fig. 10 Experiment environment.

25 サンプルを用いた。これらの合計 100 サンプルにおける GPS の測位座標と実位置との距離を地図上で目視により確認した結果、平均測位誤差は 51.2 m であった。

推定領域が大きいほど推定結果が正しい可能性は高くなるため、提案手法の性能は推定結果の正しさと推定領域の大きさのトレードオフを考慮して評価する必要がある。そこで性能評価では以下の式で定義される正解率および縮退率を用いる。

$$\text{正解率} = \frac{\text{正しい推定結果数}}{\text{全推定数}} \quad (4)$$

$$\text{縮退率} = 1 - \frac{\text{推定領域 } r \text{ の面積}}{\text{GPS 誤差円の面積}} \quad (5)$$

縮退率は提案手法による領域絞り込みの効果を表しており、1 に近いほど推定領域が小さく、良い結果であることを意味する。ここで GPS 誤差円とは、GPS 測位により得られた座標を中心とした、衛星の幾何的配置から決まる測位精度の指標 HDOP とユーザ測距誤差 UERE (User Equivalent Range Error) により決定される 2dRMS (distance Root Mean Square の 2 倍) を半径とする円のことである。2dRMS は測位精度を表す指標であり、測位誤差が典型的な分布をする場合に、誤差のうち 95% が $\pm 2dRMS$ の範囲に入ることが知られている [24]。UERE は一般的な環境で 5~7 m 程度であるが環境によって異なり、性能評価ではマルチパスの影響が大きい都市部を対象としているため、できる限り誤差円が実位置を含むよう経験的に 15 m とした。このとき、100 サンプルのうち GPS 誤差円内に実位置を含む割合は 0.9 であった。

4.2 実環境での性能評価

図 11 に提案手法による領域絞り込みの例を示す。図中の円は GPS 誤差円を示しており、中心が測位結果の座標で半径は 120 m であった。提案手法のパラメータ設定は $p_{TH} = 0.6$, $M_h = 0$ である。また星印は実位置であり、白い領域が衛星の見通し状況により特定された領域である。斜線部分が提案手法で絞り込まれた領域を表しており、提

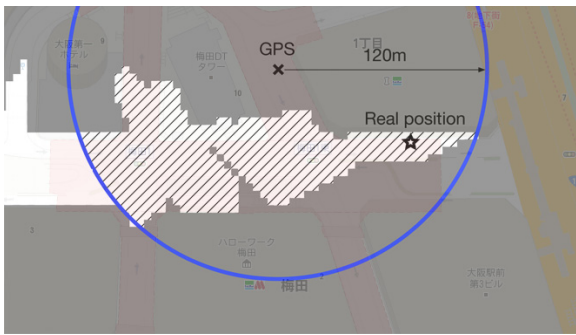


図 11 提案手法による領域絞り込みの例

Fig. 11 An example of a region estimated by the proposed method.

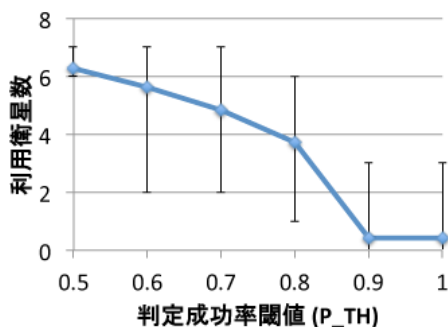


図 12 見通し判定成功率閾値 p_{TH} と利用衛星数

Fig. 12 LOS estimation success probability threshold p_{TH} vs. # of used satellites.

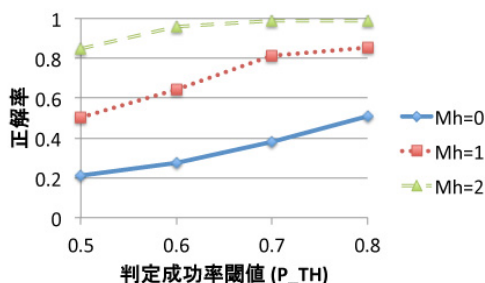


図 13 見通し判定成功率閾値 p_{TH} と正解率

Fig. 13 LOS estimation success probability threshold p_{TH} vs. correctness.

案手法によって実位置が存在する正しい道路セグメントに GPS 誤差円の範囲を絞り込んでいることが分かる。

見通し判定の成功率に対する閾値 p_{TH} および許容ハミング距離 M_h の影響を確認するため、 p_{TH} 、 M_h を変化させたときの利用衛星数、正解率、縮退率を調べた。それぞれの結果を図 12、図 13、図 14 に示す。利用衛星数および縮退率については平均値に加えて最小値、最大値を示している。また、正解率は GPS 誤差円内に実位置を含まない 10 サンプルを除外したうえで算出した。縮退率については GPS 誤差円内に実位置を含むサンプルで、提案手法により絞り込みを行った結果、実位置を含む領域が得られ

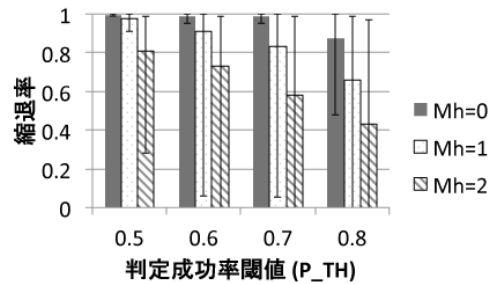


図 14 見通し判定成功率閾値 p_{TH} と縮退率

Fig. 14 LOS estimation success probability threshold p_{TH} vs. shrunken ratio.

た場合を対象に算出した。

図 5 の判定モデルで $p(s) < p_{TH}$ となるような SNR 値 s を持つ衛星はフィンガープリントから除外されるため、 p_{TH} が大きいほど、より確実に LOS/NLOS を区別できる SNR 値を持つ衛星のみを利用してフィンガープリントとのマッチングが行われることになる。したがって図 12 に示すように p_{TH} が大きくなるにつれて除外対象となる SNR 値の範囲が大きくなり、利用可能な衛星数が減少していることが分かる。以降の評価では、利用衛星数が極端に少ない $p_{TH} = 0.9, 1.0$ の場合を除外し、 $p_{TH} = 0.5 \sim 0.8$ の結果を示す。

図 13 は p_{TH} を変化させたときの正解率を示している。この結果より、 p_{TH} が大きくなるにつれて正解率は高くなっていることが分かる。この理由は、 p_{TH} を大きくすることで、見通し状況判定を誤る可能性がある衛星が除外されるためと考えられる。一方で図 14 より、 p_{TH} が大きいほど縮退率は悪化していることが分かる。この理由は、見通し判定成功率閾値 p_{TH} を大きくすると、利用可能な衛星数が減少し、フィンガープリントの粒度が粗くなるためである。また縮退率は平均が高い場合であっても 0~1 の間に広く分布しており、この結果は周辺のビルと衛星の配置に依存して縮退率が大きく変化することを示している。

また、図 13、14 では許容ハミング距離 M_h が 0, 1, 2 の場合の正解率、縮退率も示している。許容ハミング距離が大きいほど推定領域が広がるため縮退率は減少する一方、見通し判定の誤りが許容されるため、正解率は高くなる。以上の結果から、縮退率と正解率の間にトレードオフが存在することが分かる。縮退率と正解率双方のバランスがとれているパラメータ設定として、たとえば $p_{TH} = 0.7$ 、 $M_h = 1$ とすれば、提案手法によって絞り込んだ領域の平均正解率は約 81% であり、そのときの平均縮退率は 83% であることが分かる。これは GPS 誤差円の面積の 17% に絞り込みが可能であることを示している。

4.3 ハミング距離による正解率の解析

本節では、正解率に関する理論的な解析を行う。ある時

刻において見通し状況判定に利用可能な GPS 衛星数を n 、GPS 衛星の見通し状況判定成功率を p とすると、見通し状況 \vec{v} が正しい領域のフィンガープリントに一致する確率、すなわち式 (4) の正解率は p^n である。次に、 \vec{v} の n 個の衛星のうち k 個の衛星について、見通し状況判定結果が誤っていた場合について考える。このとき、正しい領域のフィンガープリントに対して k 個の要素が異なるフィンガープリントに \vec{v} は一致する。いい換えれば、正しい領域のフィンガープリントを基準としてハミング距離 k のフィンガープリントに \vec{v} は一致する。見通し状況の判定結果 \vec{v} がハミング距離 k 以下の領域に一致する確率は、以下の式で表される。

$$\sum_{i=0}^k {}_n C_i \times p^{n-i} (1-p)^i \quad (6)$$

たとえば、図 5 に示した GPS 衛星の見通し状況判定成功率に対して $p_{TH} = 0.6$ とした場合、22~24 dB の SNR 値を持つ衛星はフィンガープリントから除外される。ここでそれ以外の SNR 値がランダムに得られると仮定すれば、見通し状況判定成功率は平均 0.88 である。また、実機実験で取得した各サンプルにおいて見通し状況判定成功率が 0.6 以上である衛星数は図 12 より平均 5.61 であったため、 $p = 0.88$ 、 $n = 5$ 、 $k = 1$ として式 (6) に代入すると、0.89 となる。これは見通し状況 \vec{v} が得られたとき、実位置を基準としてハミング距離 1 以下のフィンガープリントと一致する確率が 0.89 であることを示している。4.2 節で示したように、許容ハミング距離 M_h を大きくすると式 (6) に従って正解率は向上するが、一方でフィンガープリントが一致する領域が広がっていくため、縮退率は悪化する。ハミング距離に対する許容度を大きくしたときに、どの程度領域が広がるかは衛星群の位置と建物の形状や配置によって異なり、このことは 4.2 節の図 14 に示した縮退率が幅広く分布していることから分かる。

5. まとめ

本研究ではスマートフォンなどの既存の GPS 受信機に対して、低コストで実現可能な位置精度向上法を提案した。都市環境においてはビルなどの障害物が多数存在するため、衛星の見通し状況が場所によって異なる。提案手法ではこの特性に着目し、都市の 3 次元地図と衛星の配置から、各地点における衛星ごとの見通し状況をフィンガープリントとして事前に構築しておき、GPS 信号の SNR から判定した見通し状況とのマッチングにより現在位置の絞り込みを行う。SNR は衛星ごとの信号の品質を表す指標であり、一般の GPS 受信機で取得可能なため、提案手法は既存の GPS 受信機に対して低コストで新たな付加価値を与えることができる。提案手法の性能を評価するため、大阪駅周辺で Nexus S により取得した GPS ログを用いて実

験を行った。実験結果より、GPS 測位結果の誤差範囲のうち、27%の領域に存在範囲を絞り込むことができ、絞り込んだ領域に実際の位置が含まれる割合は 82%であることが分かった。

参考文献

- [1] Google.com: Google Maps (online), available from <http://maps.google.com/> (accessed 2011-01-12).
- [2] Ubusuna.inc, Eponet, Casareal and TechMatrix: omotenavi, Ubusuna.inc and Eponet and Casareal and TechMatrix (online), available from <http://omotenavi.jp/index.html> (accessed 2011-01-13).
- [3] Modsching, M., Kramer, R. and ten Hagen, K.: Field Trial on GPS Accuracy in a Medium Size City: The Influence of Built-up, *Proc. Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp.209–218 (2006).
- [4] 坂井文泰: GPS 技術入門, 1st edition, 東京電機大学出版局 (2003).
- [5] 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).
- [6] Kawano, I., Mokuno, M., Kogure, S. and Kishimoto, M.: Japanese Experimental GPS Augmentation Using Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), *Proc. Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, pp.175–181 (2004).
- [7] Rekimoto, J., Miyaki, T. and Ishizawa, T.: LifeTag: WiFi-based Continuous Location Logging for Life Pattern Analysis, *Proc. Int. Symp. on Location- and Context-Awareness (LOCA2007)*, pp.35–49 (2007).
- [8] Agarwal, A. and Das, S.R.: Dead Reckoning in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. Wireless Communications and Networking*, pp.1838–1843 (2003).
- [9] Kim, S. and Kim, J.-H.: Adaptive Fuzzy-Network-Based C-Measure Map-Matching Algorithm for Car Navigation System, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.48, No.2, pp.432–441 (2001).
- [10] Arikawa, M., Konomi, S. and Ohnishi, K.: Navitime: Supporting Pedestrian Navigation in the Real World, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.6, No.3, pp.21–29 (2007).
- [11] Beauregard, S. and Widyawan, K.M.: Indoor PDR Performance Enhancement Using Minimal Map Information and Particle Filters, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pp.141–147 (2008).
- [12] Groves, P.D.: Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons, *Journal of Navigation*, Vol.64, pp.417–430 (2011).
- [13] Djuknic, G.M. and Richton, R.E.: Geolocation and Assisted GPS, *IEEE Computer*, Vol.2, No.2, pp.123–125 (2001).
- [14] KDDI: Technology Point – 研究開発 (R & D) – KDDI 株式会社, KDDI (オンライン), 入手先 <http://www.kddi.com/corporate/r-and-d/tech/question/2.html> (参照 2012-02-02).
- [15] 小白井亮一: わかりやすい GPS 測量, オーム社 (2010).
- [16] Suh, Y. and Shibasaki, R.: Evaluation of Satellite-based Navigation Services in Complex Urban Environments Using a Three-Dimensional GIS, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E90-B, No.7, pp.1816–1825 (2007).
- [17] Blunck, H., Kjærgaard, M.B., Toftkjær, T., Christensen, D.L. and Grønbaek, K.: Empirical Analysis and Charac-

- terization of Indoor GPS Signal Fading and Multipath Conditions, *Proc. Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. of Navigation (ION GNSS)*, pp.2362-2371 (2009).
- [18] Kjærgaard, M.B., Blunck, H., Godsk, T., Toftkjær, T., Christensen, D.L. and Grønbæk, K.: Indoor Positioning Using GPS Revisited, *Proc. Int. Conf. on Pervasive Computing*, pp.38-56 (2010).
- [19] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communications*, pp.775-784 (2000).
- [20] Misra, P. and Enge, P.: *Global Positioning System, 2nd edition*, Ganga-Jamuna Press (2011).
- [21] Glassner, A.S. (Ed.): *An Introduction to Ray Tracing, 1st edition*, Academic Press (1989).
- [22] Trimble: Trimble 3D Warehouse, Trimble Navigation Limited (online), available from <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/> (accessed 2013-04-01).
- [23] Park, G.J., Patel, A., Curtis, D., Teller, S. and Ledlie, J.: Online Pose Classification and Walking Speed Estimation Using Handheld Devices, *Proc. ACM Conf. on Ubiquitous Computing (UbiComp '12)*, pp.113-122 (2012).
- [24] Parkinson, B.W. and Spilker, J.J.: *Global Positioning System: Theory and Applications, 1st edition*, Amer. Inst. of Aeronautics (1996).



内山 彰 (正会員)

平成 20 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年イリノイ大学客員研究員。平成 21 年大阪大学大学院情報科学研究科特任助教。平成 25 年同大学院情報科学研究科助教。博士 (情報科学)。人の位置・行動セン

シングやモバイルヘルスケアに関する研究に従事。IEEE 会員。



勝田 悦子

平成 22 年大阪大学基礎工学部情報科学学科退学後、同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学。平成 24 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年より日本電気株式会社クラウドシステム研究所勤務。ネットワーク

セキュリティ等に関する研究に従事。



上嶋 祐紀 (学生会員)

平成 24 年大阪大学基礎工学部情報科学学科卒業。同年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学。モバイルセンシングや屋内ナビゲーションシステムに関する研究に従事。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学院情報科学研究科助手。

平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティング等に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。博士 (工学)。分散システム, 通信プロトコル, モバイル

コンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member。