

# 省電力ジオフェンシングのための 測位特性を考慮したハイブリッド測位方式

中川 智尋<sup>1,a)</sup> 太田 賢<sup>2</sup> 稲村 浩<sup>3</sup> 鈴木 誠<sup>4</sup> 森川 博之<sup>4</sup>

受付日 2015年8月19日, 採録日 2016年4月5日

**概要:** 本論文では, ジオフェンシングに適用できる省電力測位技術を統合するために必要となる測位特性を考慮したハイブリッド測位方式を提案する. 既存の省電力測位技術である移動検出技術, 測位間隔調整技術, ハイブリッド測位技術は互いに相補的であり, 組み合わせることで省電力効果を高めることが期待できる. 一方で, ハイブリッド測位技術が利用する基地局測位や Wi-Fi 測位等のネットワーク測位は地理的な解像度が低く, 測位結果が連続的に同一地点を示すことが頻発する. このような誤推定の空間的局所性は, 移動検出技術の精度に影響を与える. 本論文では, この影響を除去するため, ネットワーク測位において同一地点の測位結果が継続した場合に, 測位手段を GPS に切り替える方式を提案する. これにより, 入圏の検出性能の劣化を防ぎつつ, 省電力測位技術の組合せによる消費電力の削減効果が得られる. 提案方式を Android ベースのスマートフォンに実装し, 提案方式が省電力化と入圏検出精度を両立できることを示す.

**キーワード:** ジオフェンシング, 省電力技術, ハイブリッド測位

## Energy-efficient Geofencing by Positioning Feature-aware Hybrid Positioning Method

TOMOHIRO NAKAGAWA<sup>1,a)</sup> KEN OHTA<sup>2</sup> HIROSHI INAMURA<sup>3</sup>  
MAKOTO SUZUKI<sup>4</sup> HIROYUKI MORIKAWA<sup>4</sup>

Received: August 19, 2015, Accepted: April 5, 2016

**Abstract:** We propose a positioning feature-aware hybrid positioning method, which is essential to realize energy-efficient geofencing by integrating existing energy-efficient positioning technologies. Existing energy-efficient technologies, which are composed of movement detection, variable interval positioning, and hybrid positioning, are mutually complementary in providing synergetic effect of power reduction. Meanwhile, network-based positioning which is utilized in hybrid positioning produce positioning results with only low level of geographical resolution, which often results in concentrated positioning results in one place. Such positioning feature has negative impact on accuracy of movement detection function. In this paper, in order to eliminate this impact, we propose a hybrid positioning method that switches positioning measure to GPS when network-based positioning shows dubious positioning results. We implemented the proposed method on Android-based smartphone, and confirmed through field test that the proposed method realizes energy-efficiency while maintaining entrance detection accuracy.

**Keywords:** geofencing, energy-efficient technology, hybrid positioning

<sup>1</sup> 株式会社 NTT ドコモサービスイノベーション部  
Service Development Group, NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan  
<sup>2</sup> 株式会社 NTT ドコモ先進技術研究所  
Research Laboratories, NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan  
<sup>3</sup> 公立はこだて未来大学システム情報科学部  
School of Systems Information Science, Future University-Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

### 1. はじめに

地図上に設定した仮想的な境界線 (ジオフェンス) を越えたことを自動的に検出するジオフェンシング技術により,

<sup>4</sup> 東京大学先端科学技術研究センター  
RCAST, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan

a) nakagawatom@nttdocomo.com

タスクの紐づいた場所や気になる店舗の近くで、スマートフォンへ通知するリマインドサービスや、興味や関心にあったスポットやイベントを提示するレコメンドサービスが可能となる。ジオフェンシング技術の要件として、ジオフェンスへの入圏の検出精度を改善し、検出の遅延時間を短縮することが重要である。また、検出処理の改善に要する消費電力の増加を抑制することも求められる。

従来、ジオフェンシングに適用できる省電力測位技術として、移動検出技術 [1], [2], 測位間隔調整技術 [3], [4], [5], [6], ハイブリッド測位技術 [7], [8] が提案されている。これらの技術では、測位誤差や消費電力の異なる複数の測位手段やセンサを活用し、ユーザの移動状況やジオフェンスまでの距離に応じて測位契機や測位手段を決定する。これらの省電力測位技術は互いに相補的であり、統合することでさらなる省電力化が期待される。

このような観点から、本論文では、省電力測位技術の統合について示す。まず、実装と評価により、省電力測位技術の統合は省電力効果が高いものの、ネットワーク測位の測位特性から検出精度の低下が問題となることを示す。ここで、ネットワーク測位とは、携帯電話基地局からの信号を用いる基地局測位と、無線 LAN のアクセスポイントからの信号を用いる Wi-Fi 測位を指す。ネットワーク測位は GPS 測位と比較して地理的な解像度が低く、電波受信強度を用いるフィンガープリント方式等において、測位結果が連続的に同一地点を示すことが頻発する。このような測位結果の誤推定の空間的局所性は、移動検出技術の精度に影響を与える。移動検出技術では、同一の測位結果が継続することにより静止状態の誤判定が発生するため、誤推定の空間的局所性は入圏の検出漏れや検出遅延の原因となる。

続いて、上記で述べたネットワーク測位の測位特性を考慮したハイブリッド測位手法を示す。具体的には、同一の測位履歴が継続した場合に GPS 測位へ切り替えることにより、移動検出技術の誤動作を防止する。この測位方式を Android ベースのスマートフォンに実装し、実環境における動作検証により、静止状態の誤判定を抑制する効果を確認した。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- 既存の省電力測位技術を組み合わせたジオフェンシングシステムを実装し、省電力化手法の統合による消費電力の削減効果を示したこと
- 移動検出技術の性能劣化がネットワーク測位の測位結果の誤推定の空間的局所性に起因することを示し、測位精度の確保が課題となることを示したこと
- ネットワーク測位の特性を考慮したハイブリッド測位方式を実装し、実環境での評価により検出漏れや検出遅延を抑制する効果を確認したこと

本論文の構成を以下に示す。2 章では、ネットワーク測位技術の測位特性および省電力測位技術の関連研究につい

て述べる。3 章では、省電力測位技術の相乗効果について示し、ネットワーク測位の測位特性に起因するジオフェンスへの入圏の検出漏れや検出遅延の問題について述べる。4 章では、測位特性を考慮したハイブリッド測位方式を示し、提案システムの Android ベースのスマートフォンへの実装とパラメータ設定について述べる。5 章では、実環境における提案方式の評価について述べる。最後に、6 章にて結論を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 ネットワーク測位の測位特性

ネットワーク測位の方式には、電波の到達時間に基づいて測位を行う電波到達時間方式 [9], 基地局が発信する信号の到来角度を用いて測位する電波到達角度方式 [9], 基地局からの電波の受信強度を用いて測位する電波受信強度方式 [5], [6], [10], [11], [12] 等の手法がある。これらの方式のうち、電波到達時間方式では端末や各基地局間の時刻同期を必要とし、電波到達角度方式では指向性アンテナを搭載した基地局と端末側における到来角度検知機能を必要とする。電波受信強度方式には、複数の基地局からの電波受信信号強度 (RSSI 値) から距離を算出して測位を行う三辺測量方式 [5], [6] や、複数の基地局からの電波受信信号強度と位置情報の教師データを用いて学習を行うフィンガープリント方式 [10], [11], [12] がある。

電波受信強度方式では、移動中において頻繁に測位結果が同一地点を示す事象が発生しうると考えられる。たとえば、三辺測量方式において、利用可能な基地局の分布密度が不十分な場合や、障害物により電波を受信できる基地局の数が少ない場合には、受信電力に基づく測位の解像度が下がる。また、フィンガープリント方式において教師データの量が不足している場合も、測位の解像度が悪化する。

本論文では、3 章において広域で移動する状況で基地局測位と Wi-Fi 測位を併用した際の測位特性を評価し、誤推定の空間的局所性が発生することを示す。また、このような誤推定の空間的局所性がジオフェンシングにおける検出性能に及ぼす影響を考察する。

### 2.2 省電力測位技術

加速度センサや複数の測位手段を利用することで、ジオフェンスへの入圏の検出精度を維持しつつ消費電力を削減できる。本節では、関連技術として、移動検出技術 [1], [2], 測位間隔調整技術 [3], [4], [5], [6], ハイブリッド測位技術 [7], [8] について述べる。また、本論文で組み合わせる具体的な方式を選定する。

移動検出技術 [1], [2] は、加速度センサを用いて移動と静止の状態を検知し、移動中のみ測位やセンシングの処理を実施することで消費電力を削減する。たとえば、文献 [1] では、定期的に加速度センサで取得したデータを閾値と比

較する移動検出アルゴリズムと位置情報を用いた静止検出アルゴリズムが提案されている。この方式では、状態に応じて利用するセンサ種別を変更することにより省電力化を図る。文献 [2] は、加速度センサの値により移動静止判定を行うアルゴリズムを提案している。システムが起動した通常モードの消費電力はスリープ状態と比較して数百倍程度となる [2] ため、静止中に CPU をスリープ状態とすることでセンシング処理の消費電力を削減する。静止中に測位処理を停止する機能はジオフェンシングに対しても有効である。このため、本論文では、文献 [1] と同様に加速度センサと測位結果に基づいて移動および静止判定を行う移動検出技術を利用する。

測位間隔調整技術 [3], [4], [5], [6] は、移動中の測位処理のサンプリング間隔を動的に変更することにより省電力化を図る。方式 [3] は、想定した最大移動速度であらゆる方向に移動することを前提として、最も近いジオフェンスまでの距離に応じて測位間隔を決定する。これにより、ジオフェンスから離れている場合の消費電力を削減することができる。方式 [4] は、方式 [3] を拡張し、端末の移動方向を考慮して測位間隔を調整することで消費電力を削減する方式を提案している。方式 [5] は、カルマンフィルタにより GPS の測位誤差を除去して状態を推定し、移動速度に応じて測位間隔を決める。方式 [6] は、アプリケーションが設定した最大誤差や推定した移動速度等に応じて測位間隔を調整する。方式 [5] は、継続的に位置情報を取得することを目的としており、経路復元に必要な量の位置履歴を取得する。本論文では、継続的な位置情報の取得は不要であるため、消費電力削減の観点から、方式 [3], [4], [6] のようにジオフェンスまでの距離に応じて測位間隔を調整する方式を用いる。

ハイブリッド測位技術 [7], [8] は、複数の測位技術を状況に応じて併用あるいは切り替えて利用することにより、検出精度や消費電力を削減する。方式 [7] は、継続監視を目的としており、環境に依存せず測位可能な基地局測位を GPS 測位と併用することにより、ビル街や屋内における GPS の測位誤差の拡大を回避する。方式 [8] は、ジオフェンスまでの距離に応じて GPS 測位と基地局測位を切り替えることにより、消費電力の低減と検出精度の確保を両立させる。これにより、ジオフェンスから離れている場合の消費電力を削減できる。本論文では、方式 [7] と比較して消費電力の削減が可能な方式 [8] を利用する。

### 3. 省電力測位技術の統合における課題

本章では、2 章に示した既存の省電力測位技術を統合することによる相乗効果を実装により明らかにする。また、既存手法の統合により、入圏検出の性能が悪化するという問題を示す。

### 3.1 省電力測位技術の相乗効果

省電力化手法を組み合わせることによる消費電力削減の実測値を図 1 および図 2 に示す。図の横軸は経過時間 [秒]、縦軸は累積の消費電流量 [mAh] を示している。図 1 は、約 50 km 離れたジオフェンスに向けて移動している際の累積消費電流量であり、図 2 はジオフェンスから約 50 km 離れた場所に静止し続けた状態での累積消費電流量である。ジオフェンスの半径は 1 km とした。各技術について、移動検出技術 (Movement detection)、測位間隔調整技術 (Variable interval positioning)、ハイブリッド測位技術 (Hybrid positioning) の順に、それぞれ MV, VIP, HP と記載する。各技術を無効化した場合には表記しない。たとえば、MV\_VIP\_HP は、全技術が有効化された状態を示し、MV\_HP は測位間隔調整技術のみが無効化された状態を示す。全技術が無効化した場合はベースライン (Baseline) と示す。ジオフェンシング技術を利用しない場合は No geofencing と示す。なお、各方式で設定したパラメータは 4.4 節の表 2 のとおりである。

評価結果より、各省電力測位技術は相補的であり、組み合わせることで最も省電力効果が高まることが確認された。移動時の評価結果 (図 1) では、ジオフェンシング技術を有効化した方式の中では MV\_VIP\_HP と VIP\_HP の 2 つがほぼ同じ結果であり、最も省電力効果が高い。移動状態で

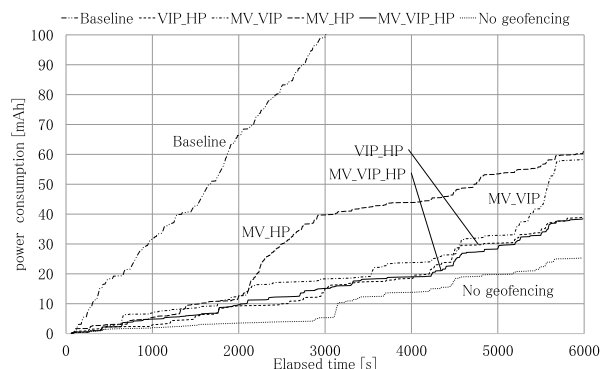


図 1 省電力測位技術の相乗効果 (移動時)  
Fig. 1 Synergy of energy-efficient geofencing (moving).

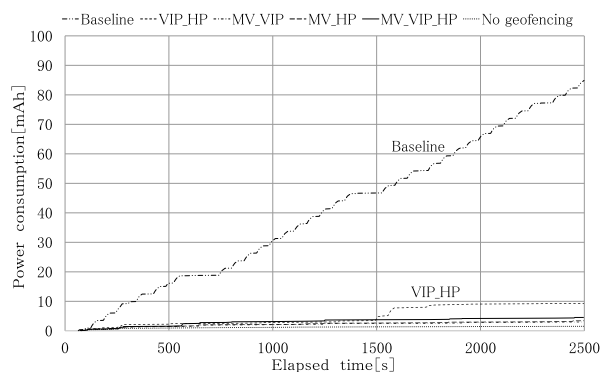


図 2 省電力測位技術の相乗効果 (静止時)  
Fig. 2 Synergy of energy-efficient geofencing (staying).



あるため、移動検出技術の有無は影響せず、これら2つの方式の差分が生じていない。MV\_VIP\_HPにはVIPの機能が含まれるため、ジオフェンスから離れた状態では測位頻度が小さくなる。このため、ジオフェンスに近づく前の2,500秒付近では、MV\_HPの方がMV\_VIP\_HPと比較して消費電力が大きくなっている。MV\_VIPはGPS測位を優先するため、ジオフェンスに接近して測位頻度が高まった5,500秒付近で消費電力が大きくなっている。静止時の評価結果(図2)では、移動検出技術を含まないベースライン方式およびVIP\_HPが他の方式と比較して悪化している。この2つの方式以外では、移動検出技術の効果によりジオフェンシング技術が無効化した場合(No geofencing)とほぼ同じ消費電力に抑制されている。

### 3.2 検出性能の悪化

省電力測位技術の相乗効果が確認された一方で、既存手法を組み合わせた場合に検出性能が劣化するという問題が確認された。予備実験により確認された測位特性に起因する静止状態の誤判定を図3に示す。左上の地図内のS印は出発点、G印は到着点を示し、黒の位置マークは省電力測位技術が無効化したベースライン方式における測位結果、白の位置マークはMV\_HP方式の測位結果を示す。ジオフェンスはG印を中心に半径1kmで設定している。右上の地図はジオフェンス周辺の拡大図であり、G印の周囲の円はジオフェンスを示す。図3の下部のグラフは、横軸に45分以降の時間経過、縦軸にジオフェンスの中心までの距離[m]を対数で示している。省電力測位技術が無効化したベースラインの方式では、1時間を経過した後にジオフェ

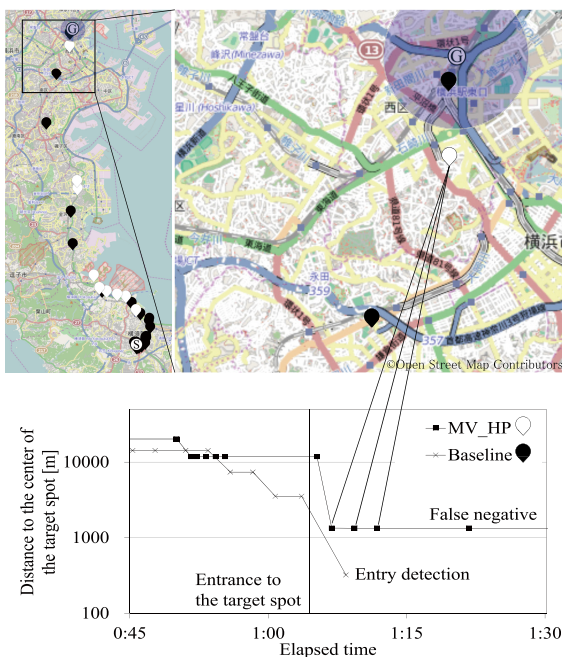


図3 入圏検出性能の悪化

Fig. 3 Degradation of entrance detection.

ンスまでの距離が1km未満となったことを検知し、ジオフェンスへの入圏を検出している。これに対して、MV\_HPでは、1時間を経過したところで取得した測位結果がジオフェンスの手前であり、最終的にジオフェンスの検出ができず、検出漏れとなっている。MV\_HPで検出漏れが発生した原因は、移動検出技術における静止状態の誤判定が発生したためである。3回連続で同一の地点を取得した結果、移動状態であるにもかかわらず静止状態に遷移して測位を停止しており、ジオフェンス内において実際に静止したことにより検出漏れにつながっている。

このような検出性能の悪化の原因はネットワーク測位の測位特性に起因する。ネットワーク測位の測位結果が一時的に集中する様子を図4に示す。図4の左は測位を実施した際の実際の位置を意味し、右は得られた測位結果を示している。このようにネットワーク測位において測位結果が局所的に集中すると、移動検出技術の誤動作につながる。

ネットワーク測位の特性が特定の機種に依存しないことを確認するため、ネットワーク測位を継続した場合の測位結果を計測した(図5)。この実験では、異なるメーカーのAndroid端末3機種を用いて、約50km離れた地点間を電車により往復した。電車での移動は片道2時間であり、目的地周辺で4時間滞在した。いずれの結果においても、ネットワーク測位の結果が、移動中であるにもかかわらず、一時的に同一地点を示すことが確認された(図5の赤い円で示した拡大部分)。

この結果から、Android OSを搭載した端末の場合には、ネットワーク測位の誤推定の空間的局所性は、特定機種に依存せずに発生することが分かる。なお、移動中であるにもかかわらず同一地点を示した際の移動距離は、図5の下段の4例について、左の図からそれぞれ7.6km, 5.9km, 18.5km, 9.1kmである。基地局測位では基地局の分布密度の不足、電波の遮蔽、およびフィンガープリント方式における学習データの不足等により誤推定の空間的局所性が生じると考えられる。また、Wi-Fi測位では数km以上の移動が生じていることから、フィンガープリント方式においてモバイルWi-Fiルータの情報が誤って学習されたことが誤推定の空間的局所性の原因と考えられる。

この実験における移動状態および静止状態における移動

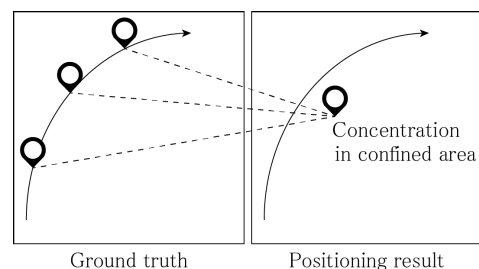


図4 ネットワーク測位の測位特性

Fig. 4 Positioning feature of network-based positioning.

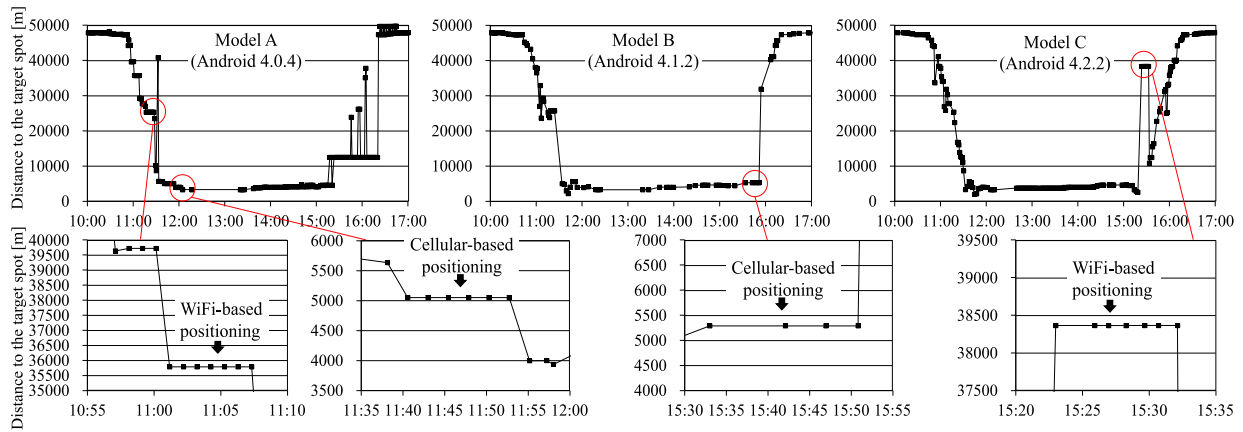


図 5 ネットワーク測位の測位特性 (Android 端末 3 機種による実測)

Fig. 5 Positioning feature of network-based positioning (field test with three models of Android-based smartphone).

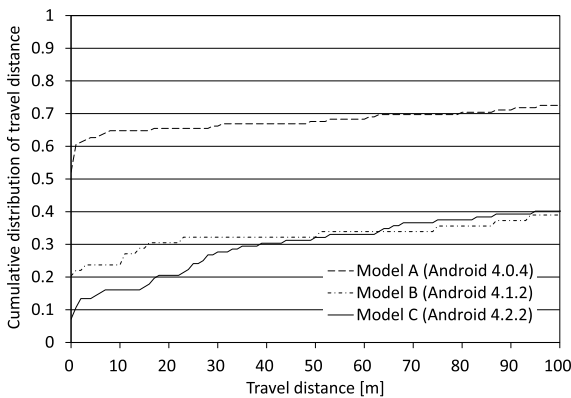


図 6 移動距離の累積度数分布 (移動状態)

Fig. 6 Cumulative distribution of travel distance (moving).

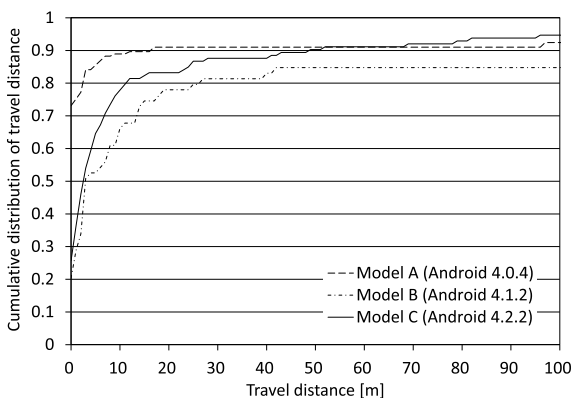


図 7 移動距離の累積度数分布 (静止状態)

Fig. 7 Cumulative distribution of travel distance (staying).

距離の累積度数分布を、それぞれ図 6 および図 7 に示す。移動距離は、測位結果の連続した 2 地点間の距離であり、静止移動状態の判定に影響する。図 6 より、移動状態では、Model A, B, C において完全に同一の地点を示す測位結果が、それぞれ 52%, 20%, 7% 発生していることが分かる。なお、この結果では、駅等で停止した状態は除去している。また、図 7 に示すとおり、静止状態においても測位

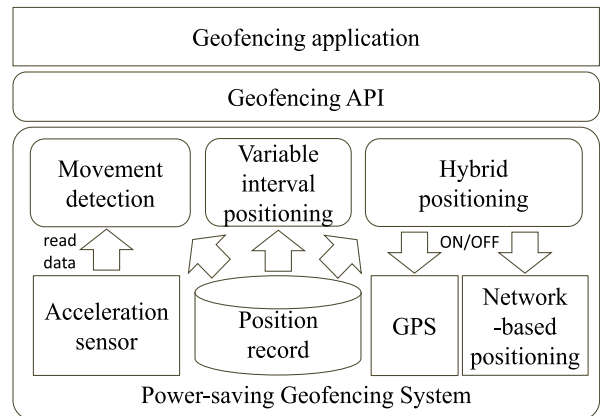


図 8 ジオフェンシングシステムの構成

Fig. 8 Geofencing system architecture.

誤差が発生し、測位結果が完全に一致するケースは Model A, B, C においてそれぞれ 73%, 20%, 26% である。

#### 4. 測位特性を考慮したハイブリッド測位方式

省電力化手法を統合したシステム構成を図 8 に示す。既存の省電力測位技術である移動検出技術 (Movement detection)、測位間隔調整技術 (Variable interval positioning)、ハイブリッド測位技術 (Hybrid positioning) を組み合わせている。このうち、ハイブリッド測位技術について、3.2 節で述べた検出性能悪化の問題に対処するための機能追加を行う。

##### 4.1 省電力化手法の統合

各省電力測位技術の処理手順を図 9 に示す。最初に、移動検出機能は、加速度センサによる移動静止判定 (Movement detection (i)) を行う。静止と判定した場合の次の加速度センシングまでの実行周期は  $T_{acc}$  とする。移動と判定した場合は、測位処理を行い、得られた測位結果に基づいて監視スポットへの入圏を検知する。 $T_{acc}$  を大きくする

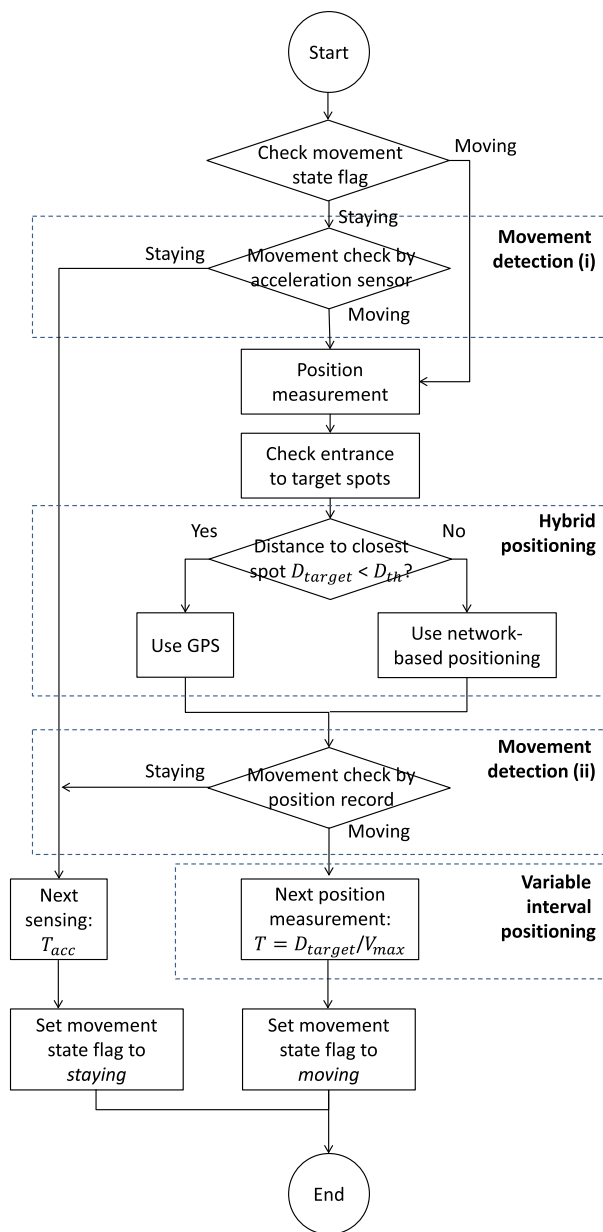


図 9 省電力ジオフェンシングのフローチャート  
Fig. 9 Flowchart of energy-efficient geofencing.

ほど加速度センサによるセンシングの間隔が大きくなり、消費電力を削減できる。その反面、静止中と判定されたまま移動した場合、検出漏れの原因となる。

次に、ハイブリッド測位機能 (Hybrid positioning) は、最も近い監視スポットまでの距離  $D_{min}$  を閾値  $D_{th}$  と比較することで測位手段の切替えを判断する。  $D_{min}$  が  $D_{th}$  より大きい場合には基地局測位を利用し、  $D_{th}$  未満の場合には GPS を用いる。  $D_{th}$  を大きくするほど消費電力の小さい基地局測位を利用することで省電力化される。

次に、移動検出機能の処理として、測位結果による移動静止判定 (Movement detection (ii)) を行う。前回の測位結果からの移動距離が閾値を下回った場合に静止と判定する。移動中と判定された場合には、測位間隔調整機能により測位間隔を決定する。

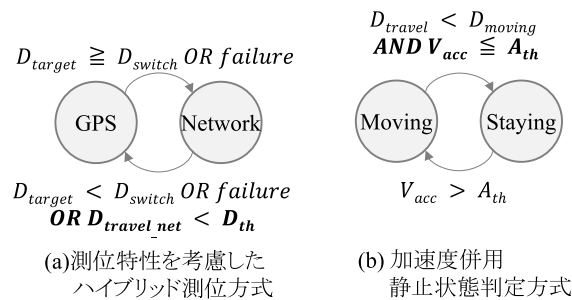


図 10 測位特性を考慮したハイブリッド測位方式  
Fig. 10 Positioning feature-aware hybrid positioning method.

測位間隔調整機能 (Variable interval positioning) は、最も近い監視スポットまでの距離  $D_{min}$  と最大想定速度  $V_{max}$  を用いて、測位間隔  $T$  を  $D_{target}/V_{max}$  に設定する。測位間隔  $T$  には上限値  $T_{max}$  および下限値  $T_{min}$  を設ける。  $V_{max}$  が大きいほど測位間隔が短くなり、検出精度が高まる。

#### 4.2 測位手段と測位履歴に基づく GPS 測位への切替え

ネットワーク測位の特性に起因する静止状態の誤判定を回避するため、測位結果に基づいて GPS 測位への切替えを行うハイブリッド測位方式を提案する。提案方式では、ネットワーク測位の結果に誤推定の空間的局所性がみられる場合に GPS 測位への切替えを行う (図 10 (a))。既存方式の状態遷移に対して、ネットワーク測位から GPS 測位に切り替える際の条件を追加する。すなわち、指定期間  $T_{monitor}$  内に GPS 測位が行われておらず、ネットワーク測位の結果が閾値  $D_{th}$  内に集中している場合に GPS 測位に切り替える。この条件により、測位結果が空間的局所性を持つ際に正確な測位結果を取得し、静止状態の誤判定を回避できる。

ハイブリッド測位技術の改善に加えて、移動検出技術についても静止状態の誤判定を回避するための拡張を行う (図 10 (b))。移動状態から静止状態への遷移の判定に加速度センサを併用することにより、位置履歴だけでは静止と判定される場合でも、動きが検出されれば移動状態を維持する。提案システムにおけるパラメータを表 1 に示す。

#### 4.3 ソフトウェア構成

提案アルゴリズムにおける省電力測位技術を実現するには、測位処理や加速度データ取得のセンシング処理、およびこれらの処理をスケジューリングする処理の間のみシステムの起動状態を維持し、各処理を完了し次第、システムをスリープ状態とする必要がある。このため、Android においてシステムの起動状態を管理する WakeLock クラスを利用する。

Android 端末に提案方式を実装する際のソフトウェア構成を図 11 に示す。省電力化のための処理を行うクラスを EnergyEfficientGeofencing クラスとし、測位処理や加速度



表 1 省電力技術のパラメータ

Table 1 Parameters for energy-efficient geofencing.

省電力測位技術	パラメータ	説明
移動検出技術	$D_{travel}$	前回の測位結果からの移動距離
	$D_{moving}$	静止判定のための距離の閾値
	$V_{acc}$	加速度センサの値
	$A_{th}$	移動判定のための加速度の閾値
	$T_{acc}$	加速度センシングの実行周期
測位間隔調整技術	$V_{max}$	想定最大速度
ハイブリッド測位技術	$D_{target}$	ジオフェンスの境界までの距離
	$D_{switch}$	測位手段切替のためのジオフェンス境界までの距離の閾値
	$T_{monitor}$	ネットワーク測位の結果を監視する期間
	$D_{travel\_net}$	$T_{monitor}$ 内のネットワーク測位の結果より算出した移動距離
	$D_{th}$	GPS 測位への切替を判定するための距離の閾値

表 2 パラメータの設定値

Table 2 Parameter setting.

省電力測位技術	パラメータ	値
移動検出技術	$T_{acc}$ <sup>a</sup>	600 sec
	サンプリング周期 <sup>b</sup>	SENSOR_DELAY_NORMAL (5 sample/sec)
	サンプリング時間 <sup>b</sup>	3 sec
	$A_{th}$ <sup>b</sup>	0.2 m/s <sup>2</sup>
	$D_{moving}$ <sup>b</sup>	500 m
測位間隔調整技術	$V_{max}$ <sup>a</sup>	100 km/h
ハイブリッド測位技術	$D_{switch}$ <sup>a</sup>	10 km
	GPS 測位のタイムアウト <sup>b</sup>	45 sec
	ネットワーク測位のタイムアウト <sup>b</sup>	10 sec
	$T_{monitor}$ <sup>b</sup>	1,800 sec
	$D_{th}$ <sup>b</sup>	300 m

<sup>a</sup> 計算機シミュレーションにより設定 <sup>b</sup> 予備実験により設定

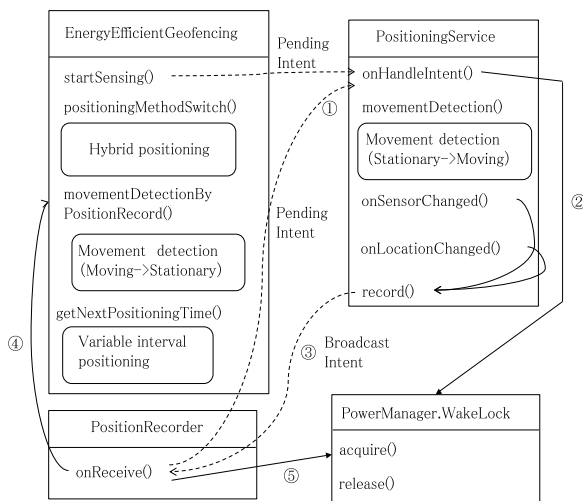


図 11 Android 端末への実装におけるソフトウェア構成

Fig. 11 Implementation for Android-based smartphones.

センサによるセンシングを行う PositioningService クラスとは分離する構成とした。PositioningService は外部からの PendingIntent を受信した契機で測位処理またはセンシング処理を行う (図 11 ①)。PendingIntent は Android においてオブジェクト間で通知を行う Intent 機能の一種で、指定した時間の経過後に通知を行える。これにより、測位処理を測位間隔調整アルゴリズムが指定した時間間隔で実施できる。なお、PositioningService がセンシング処理を行う前後では、PowerManager.WakeLock クラスの機能を用いて、起動状態の確保と解放の処理を行う (図 11 ②)。これにより、センシング処理中にシステムがスリープ状態

に遷移することを防止する。

省電力化のための移動検出技術、測位間隔調整技術、ハイブリッド測位技術は、EnergyEfficientGeofencing クラスに実装する。これらの機能は過去の測位結果に基づいて処理する必要があるため、PositioningService からのセンシング結果の通知を受けて処理を行う。PositioningService においてセンシング処理の結果が onSensorChanged() もしくは onLocationChanged() のコールバック関数に通知されると、PositioningService はセンシング結果を通知する BroadcastIntent を発行し、PositionRecorder クラスに結果を記録する (図 11 ③)。ネットワーク測位は、測位処理に NETWORK\_PROVIDER を指定し、基地局測位もしくは Wi-Fi 測位を行う。PositionRecorder は、記録した測位結果に基づく各技術の処理を EnergyEfficientGeofencing クラスの関数を用いて実行する (図 11 ④)。また、PositionRecorder がジオフェンシングの各技術の提供する処理を実行する前後では、PowerManager.WakeLock クラスの機能を用いてスリープ状態への遷移を防止する (図 11 ⑤)。

#### 4.4 パラメータ設定

各省電力測位技術に関して設定したパラメータを表 2 に示す。移動検出技術の加速度センサによるセンシングを行う実行周期  $T_{acc}$ 、測位間隔調整技術における端末の想定最大速度  $V_{max}$ 、ハイブリッド測位技術における測位手段を切り替えるジオフェンスまでの距離  $D_{switch}$  は、計算機シミュレーションにより設定した。計算機シミュレーション

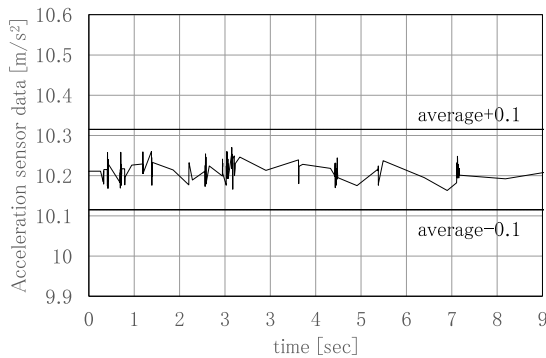


図 12 加速度データ (静止状態)

Fig. 12 Acceleration sensor data (staying).

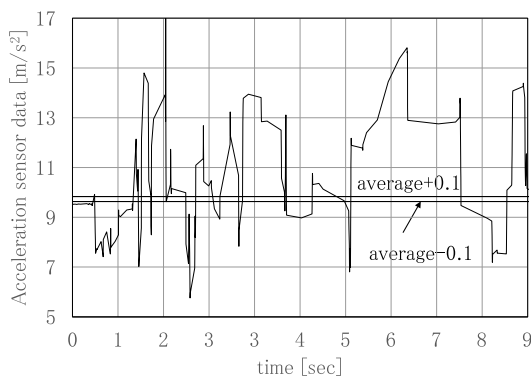


図 13 加速度データ (移動状態)

Fig. 13 Acceleration sensor data (moving).

では、現実的な移動モデルである Weighted waypoint 移動モデル [13] を用い、日常生活における自転車や車等による移動を考慮して最大速度を 72 km/h とした。ジオフェンスへの入圏検出精度を評価し、適合率と再現率の調和平均である F 値で 0.95 以上を確保できる設定値に表 2 の値を採用した。高速道路、新幹線や飛行機等、さらに高速な移動を想定する場合には、想定最大速度  $V_{max}$  をより大きい値にすることが必要となる。

また、移動検出技術において移動状態を検出する加速度センサの閾値  $A_{th}$ 、サンプリングレートおよびサンプリング時間は、端末を机上に置いた静止状態 (図 12) と、鞆に入れて歩行した移動状態 (図 13) におけるデータを取得し、取得したデータについて状態を正しく判定できる閾値を設定した。図 12 および図 13 の横軸は時間 [秒] を示し、縦軸は加速度センサの値を示す。静止時では平均値を中心として全データが  $0.1 \text{ m/s}^2$  以内であるのに対して、歩行時の上限値と下限値の差分は最大で  $10.0 \text{ m/s}^2$  を超え、静止時の値を大きく上回る。この結果に基づき、移動検出技術の加速度センサのサンプリング周期は SENSOR\_DELAY\_NORMAL (5 サンプル/秒)、サンプリング時間は 3 秒間とし、加速度の閾値は  $0.2 \text{ m/s}^2$  とした。測位処理は、GPS 測位のタイムアウトを 45 秒、ネットワーク測位のタイムアウトを 10 秒とした。タイムアウト時間は、間欠的に測位を実施した

場合に要する時間を予備実験により評価して決定した。また、提案方式において測位結果を監視する期間  $T_{monitor}$  および GPS 測位への切替えを判定する閾値  $D_{th}$  は、図 5 に示した予備実験の結果に基づき、誤推定の空間的局所性の発生期間および静止中のネットワーク測位の測位誤差を考慮して決定した。

## 5. 評価

### 5.1 比較方式

提案するハイブリッド測位方式と加速度併用静止状態判定方式の貢献を明らかにするため、各方式をそれぞれ有効化および無効化した 4 つの組合せについて評価する。

単純統合方式 (Simple) では、いずれも無効化し、既存の省電力測位技術を組み合わせてジオフェンシングを行う。なお、この方式は、3 章に記載した移動検出技術、測位間隔調整技術、ハイブリッド測位技術を組み合わせた方式であり、MV\_VIP\_HP 方式と同一である。GPS 切替え方式 (PROP\_GPS) では、測位特性を考慮したハイブリッド測位方式のみを有効化する。加速度併用方式 (PROP\_ACC) では、加速度併用静止状態判定方式のみを有効化する。GPS・加速度併用方式 (PROP\_Both) では、双方を有効化する。

### 5.2 評価シナリオ

性能評価のシナリオでは、移動シナリオと静止シナリオ各方式を搭載した 4 台の端末で性能を比較した。

移動シナリオでは、徒歩と電車によりジオフェンスへ向けて移動し、約 2 時間後にジオフェンスに入圏した。移動シナリオでは、都市エリアや郊外エリアにおいて基地局や Wi-Fi アクセスポイントの配置密度や遮蔽物等の測位環境が変化する状況での静止状態の誤判定の発生回数、検出遅延時間、および消費電力を評価する。静止シナリオでは、約 50 km 離れた地点で 12 時間静止した状態とする。静止シナリオでは、ジオフェンスへの入圏は発生しないため、消費電力への影響のみを評価する。移動シナリオは測位環境が動的に変化するため 28 回試行し、静止シナリオは 2 回の試行により評価した。

### 5.3 評価結果

移動シナリオにおいて静止中および移動中の時刻を記録し、4 つの方式の推定結果と照合を行い、推定精度を評価した。移動シナリオの評価結果より、提案方式では静止状態の誤検知が抑制されることが確認された。静止状態の誤検知回数とジオフェンスへの入圏検出の遅延時間を図 14 に示す。1 回の試行あたりの静止状態の誤検知数は第 1 軸に棒グラフにより示している。Simple 方式では、誤検知数が 0.36 であり、PROP\_GPS 方式は誤検知数を 0.24 まで抑制している。PROP\_GPS 方式において誤検知が生じる理由は、GPS 測位の結果が得られずに判定条件として利用でき



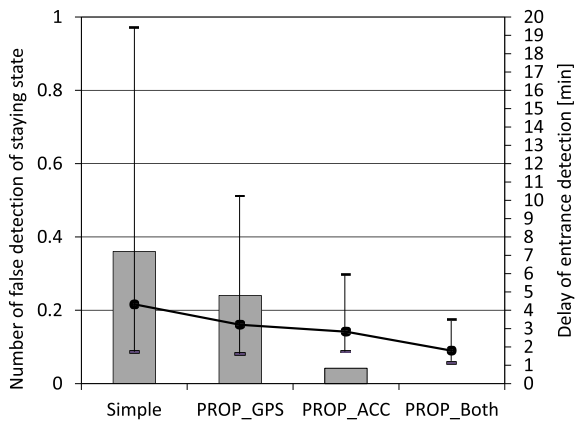


図 14 静止状態誤判定回数と入圏検出遅延時間

Fig. 14 Number of false detection of staying state and entrance detection delay.

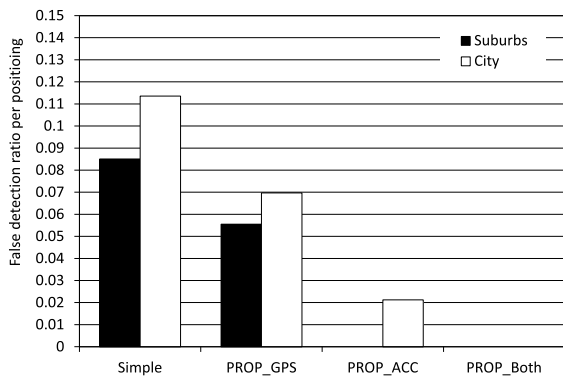


図 15 郊外および都心における静止状態誤検出率

Fig. 15 False detection ratio of staying state in the suburbs and city area.

ないことが考えられる。さらに、PROP\_ACC 方式は加速度併用移動検出技術の効果により、誤検知数を 0.04 に抑制し、PROP\_Both 方式は、本評価では誤検知は発生しなかった。PROP\_ACC 方式において誤検知が生じる理由は、移動中において等速運動状態や一時停止状態のため閾値以上の加速度が検知できないことが考えられる。PROP\_Both 方式では、GPS の利用と加速度センサの利用の双方により、誤検知の抑制効果が高まることが確認された。

提案方式は入圏検出の遅延時間を短縮する効果があることも確認された。検出の遅延時間を図 14 の第 2 軸に折れ線グラフで示す。Simple 方式の平均遅延時間は 4.3 分だが、PROP\_GPS 方式では 3.2 分となっている。また、PROP\_ACC 方式では 2.8 分、PROP\_Both 方式では 1.8 分まで遅延時間を短縮している。グラフ内の誤差範囲を示すエラーバーは遅延時間の最大値と最小値を示している。

異なるエリアにおける提案方式の効果を検証するため、横浜以南の郊外エリア (Suburbs) と横浜以北の都市エリア (City) における静止状態の誤検出率を分析した (図 15)。この図では、ネットワーク測位の実行回数に対する静止状態の誤検出率を示している。都市エリアでは郊外エリアと

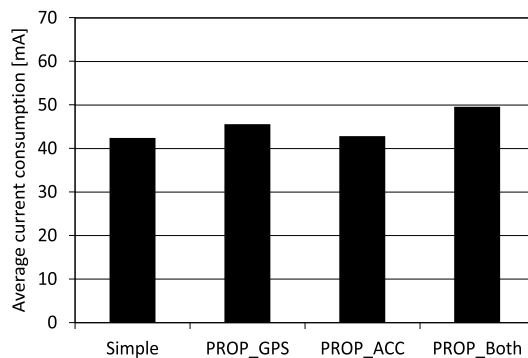


図 16 平均消費電流 (移動シナリオ)

Fig. 16 Average electric current (moving scenario).

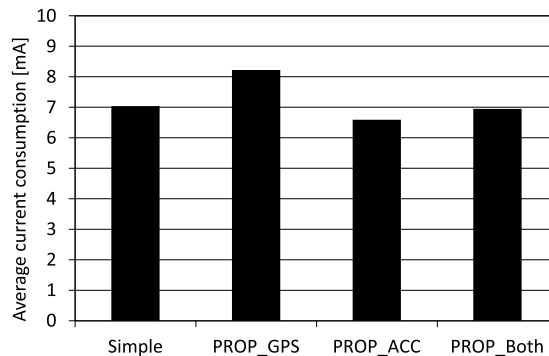


図 17 平均消費電流 (静止シナリオ)

Fig. 17 Average electric current (staying scenario).

比較して状態の誤検出率が高くなっている。これは特に都市部で基地局測位の電波受信強度の悪化により、誤推定の空間的局所性が多く発生することに起因していると考えられる。

移動シナリオにおける平均消費電流を図 16 に示す。Simple 方式と PROP\_ACC 方式の比較により、PROP\_ACC 方式において移動中に加速度センサを併用することによる消費電力の増加は無視できる水準であることが分かる。また、加速度センサと GPS 切替えをともなう PROP\_Both 方式において平均消費電流の増加は 7 mA であった。これは、1 時間あたりの消費電流量が、今回の評価で利用した端末の電池容量 2,100 mAh の 0.4% 未満であり、静止状態の認識精度を向上させることができる利点に対して十分に小さく、許容できる水準と考えられる。なお、消費電力の計測には Android 端末向けのモデルベースの消費電力プロファイラ [14] を利用した。

静止シナリオにおける平均消費電流を図 17 に示す。各方式の消費電力の差分は 2 mA 未満であった。提案方式による増分は、今回の端末の電池容量の 0.1% 未満であり、十分に小さく許容できる水準と考えられる。なお、静止シナリオにおいて誤検知により移動状態と判定するケースは発生しなかった。

## 6. おわりに

本論文では、ネットワーク測位の測位結果の誤推定の空間的局所性が省電力ジオフェンシングにおいて静止状態の誤判定の問題を発生させることを示し、測位特性を考慮したハイブリッド測位方式を提案した。提案方式では、ネットワーク測位の特性を監視し、同一の測位履歴を取得した場合にGPS測位に切り替えることにより、状態判定の精度を確保する。提案方式をAndroidベースのスマートフォンに実装し、実環境での評価により、提案方式の消費電力のオーバヘッドは十分に小さく、静止状態の誤判定を抑止する効果があることを確認した。

## 参考文献

- [1] Chon, Y. and Cha, H.: LifeMap: A Smartphone-Based Context Provider for Location-Based Services, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.10, No.2, pp.58–67 (2011).
- [2] Priyantha, B., Lymberopoulos, D. and Liu, J.: LittleRock: Enabling Energy-Efficient Continuous Sensing on Mobile Phones, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.10, No.2, pp.12–15 (2011).
- [3] Farrell, T., Stuttgart, U., Cheng, R., et al.: Energy-Efficient Monitoring of Mobile Objects with Uncertainty-Aware Tolerances, *Proc. IEEE Database Engineering and Applications Symposium (IDEAS 2007)*, pp.129–140 (2007).
- [4] 中川智尋, 太田 賢, 稲村 浩, 鈴木 誠, 森川博之: 省電力ジオフェンシングサービスのための端末進行方向を考慮した間隔可変測位方式, *情報処理学会論文誌*, Vol.56, No.1, pp.13–22 (2015).
- [5] Taylor, M.I. and Labrador, A.M.: Improving the Energy Consumption in Mobile Phones by Filtering Noisy GPS Fixes with Modified Kalman Filters, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2011)*, pp.2006–2011 (2011).
- [6] Farrell, T., Lange, R. and Rothermel, K.: Energy-efficient Tracking of Mobile Objects with Early Distance-based Reporting, *Proc. 4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2007)*, pp.1–8 (2007).
- [7] Fritsche, C., Klein, A. and Würtz, D.: Hybrid GPS/GSM Localization of Mobile Terminals using the Extended Kalman Filter, *Proc. IEEE Workshop on Positioning, Navigation, and Communication 2009 (WPNC 2009)*, pp.189–194 (2009).
- [8] Deblauwe, N. and Treu, G.: Hybrid GPS and GSM Localization – Energy-efficient Detection of Spatial Triggers, *Proc. IEEE Workshop on Positioning, Navigation, and Communication 2008 (WPNC 2008)*, pp.181–189 (2008).
- [9] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., et al.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews*, Vol.37, No.6, pp.1067–1080 (2007).
- [10] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., et al.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *Proc. International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE '05)*, pp.116–133 (2005).
- [11] Constandache, I., Gaonkar, S., Sayler, M., et al.: EnLoc:

Energy-Efficient Localization for Mobile Phones, *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2009)*, pp.2716–2720 (2009).

- [12] Peak, J., Kim, K., et al.: Energy-Efficient Positioning for Smartphones using Cell-ID Sequence Matching, *9th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2011)*, pp.293–306 (2011).
- [13] Hsu, W., Merchant, K., Shu, H., Hsu, C. and Helmy, A.: Weighted Waypoint Mobility Model and its Impact on Ad Hoc Networks, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, pp.59–63 (2005).
- [14] Kamiyama, T., Inamura, H. and Ohta, K.: A model-based energy profiler using online logging for Android applications, *2014 7th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking*, pp.7–13 (2014).



中川 智尋 (正会員)

株式会社 NTT ドコモ。平成 12 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 (株) NTT ドコモ入社。平成 27 年東京大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。アドホック・ネットワーク、端末セキュリティ、コンテキスト・ウェアコンピュータリングの研究開発に従事。2008 年度情報処理学会山下記念研究賞。



太田 賢 (正会員)

株式会社 NTT ドコモ。平成 10 年静岡大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。平成 11 年 NTT 移動通信網 (株) 入社。現在、NTT ドコモ先進技術研究所勤務。モバイルコンピュータリング、端末セキュリティ、分散システムに関する研究に従事。訳書『コンピュータネットワーク第 5 版』等。電子情報通信学会会員。本会シニア会員。



稲村 浩 (正会員)

平成 2 年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。平成 10 年より NTT ドコモ。平成 28 年より公立はこだて未来大学教授。博士 (工学)。モバイルネットワーク、スマートデバイスのシステムソフトウェアに関する研究開発に従事。電子情報通信学会、ACM、IEEE 各会員。本会業績賞。本会シニア会員。



鈴木 誠 (正会員)

平成 17 年東京大学工学部電気工学科卒業。平成 19 年同大学大学院新領域創成科学研究科基盤情報学専攻修士課程修了。平成 22 年同大学院同研究科同専攻博士課程修了。科学技術博士。平成 20 年～22 年日本学術振興会特別研究員。平成 22 年～24 年東京大学先端科学技術研究センター特任助教。現在、同大学先端科学技術研究センター助教。ユビキタスコンピューティング，無線センサネットワーク，IoT/M2M 等の研究に従事。平成 22 年電子情報通信学会論文賞。電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員。



森川 博之 (正会員)

昭和 62 年東京大学工学部電子工学科卒業。平成 4 年同大学大学院博士課程修了。現在、同大学先端科学技術研究センター教授。工学博士。平成 14 年～18 年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。モノのインターネット/M2M/ビッグデータ，センサネットワーク，無線通信システム等の研究に従事。本会論文賞，電子情報通信学会論文賞 (3 回)，情報通信学会論文賞，ドコモモバイルサイエンス賞，総務大臣表彰，志田林三郎賞等受賞。新世代 M2M コンソーシアム会長，OECD デジタル経済政策委員会 (CDEP) 副議長等。