

携帯端末向けセンサ統合型ジオフェンシングの システム最適化に関する性能評価

中川智尋^{†1†2} 太田賢^{†1} 稲村浩^{†1} 鈴木誠^{†2} 森川博之^{†2}

本稿では、ジオフェンシングにおける入圏検出技術の検出精度および省電力性能を向上するため、ユースケースに応じた最適なシステム構成を明らかにすることを目的とする。従来、スマートフォンに搭載された加速度センサや複数の測位技術を動的に有効化することで消費電力を削減する技術が提案されている。本稿では、入圏検出に適用可能な要素技術として、移動検出機能、間隔可変測位機能、測位手段切替機能を組み合わせたシステムを検討する。これらの機能は互いに相補的であり、異なる状況で効果を発揮するが、検出精度や消費電力の性能への貢献度は評価されていない。そこで、本稿では、各機能を連携させるセンサ統合型の入圏検出システムを示し、ジオフェンシングサービスにおける典型的なシナリオについてシミュレーションを行った。評価結果より、検出精度を重視する低密度シナリオでは、移動検出機能と間隔可変測位機能を有効化した場合が最適な構成であり、検出精度をF値で0.95に維持しつつ、全機能を無効化した場合と比較して消費電力を93%削減できることを示す。また、消費電力を重視する高密度シナリオでは、全機能を有効化する構成が最適であり、全機能を無効化した場合と比較して検出精度の劣化をF値で0.03に抑えつつ、消費電力を89%削減できることを示す。

Evaluation of Sensor Fused Geofencing System for Scenario-specific Optimization

TOMOHIRO NAKAGAWA^{†1†2} KEN OHTA^{†1} HIROSHI INAMURA^{†1}
MAKOTO SUZUKI^{†2} HIROYUKI MORIKAWA^{†2}

1. はじめに

地図上に仮想的な領域を設定し、その境界を越えたことを検知することにより、ユーザの所在に従って適切な処理を行うことができる。このようなサービスは、ジオフェンシングと呼ばれて注目を集めており、実現のための要素技術が研究されている [1][2][3]。

本稿では、ジオフェンシングにおける検出対象のスポット（以下では、監視スポットと呼ぶ）への入圏を省電力で検出する入圏検出技術に着目する。例えば、通勤や通学中の駅でのリマインドや、嗜好の似た友人が高く評価する店舗のレコメンドなどの応用が可能となる。

位置情報を高精度かつ省電力に取得する省電力測位技術として、継続的に位置を監視することを目的とした継続監視技術[4][5][6][7][8][9]がある。継続監視技術は、ナビゲーションや物品等のトラッキング、ライフログ目的での移動経路の記録等の応用があり、経路を再現することを目的としている。この目的に対して、静止中の測位処理を停止する移動検出機能[4][5]、移動速度に応じて測位間隔を調整する間隔可変測位機能[6][7]、測位手段の併用により測位誤差を低減する測位手段切替機能[8][9]が提案されている。これに対して、入圏検出技術は、測位処理を削減しつつ入

圏の検出精度を確保することが課題となる。入圏検出技術では監視スポットへ至る経路の情報は不要であり、継続監視技術と比較すると測位処理を削減できる余地が大きい。但し、測位間隔が大きくなるため、移動状況への変化に対して追従できない可能性が高まり、入圏の検出精度を確保することは難しい。

入圏検出技術に適用できる省電力測位技術として、移動検出機能[4][5]、間隔可変測位機能[2]、測位手段切替機能[10]が提案されている。移動検出機能[4][5]は、継続監視技術として提案されているが、入圏検出技術として利用することができる。入圏検出を目的とした間隔可変測位機能[2]は、監視スポットまでの距離に応じて測位間隔を調整することにより、継続監視を目的とした間隔可変測位機能[6][7]よりも測位回数を削減できる。また、測位手段切替機能[10]は、高精度で消費電力の大きいGPSと、測位精度が劣るが消費電力を抑制できる基地局測位を切替えることで、監視スポットから離れた場合の消費電力を削減する。

これらの入圏検出向けの各機能は互いに相補的に動作し、組み合わせて利用することができるが、性能要件に応じた最適な組合せは検討されていない。ジオフェンシングの要求条件には、消費電力の削減と検出精度の確保があり、両者はトレードオフの関係にある。このトレードオフにおいて重視する性能は、有効化する機能の組合せにより変化する。すなわち、サービスの要件に応じて最適なシステム構成があると考えられる。

^{†1} 株式会社NTTドコモ先進技術研究所 Research Laboratories, NTT DOCOMO, Inc.

^{†2} 東京大学先端科学技術研究センター RCAST, The University of Tokyo

そこで、本稿では、ジオフェンシングにおいて、サービスの要求条件を満たすシステム構成や最適化の優先度を明らかにすることを目的とする。このため、移動検出機能[4][5]、間隔可変測位機能[2]、測位手段切替機能[10]を構成要素とするシステムを示し、各機能を連携させる入圏検出アルゴリズムを示す。

続いて、各機能を独立に有効化または無効化したシステム構成におけるシミュレーションを行い、各機能の省電慮性能および検出精度への貢献度を評価する。評価のシナリオには、省電力性能を重視する高密度シナリオと、検出精度を重視する低密度シナリオを用いる。また、移動モデルには、現実的な移動状況を模擬するため階層型に拡張した Weighted Waypoint 移動モデル[12]を用いる。

評価結果より、高密度シナリオでは、移動検出機能と間隔可変測位機能を有効化した場合が最適な構成であることを示す。このシナリオでは、検出精度を F 値で 0.95 に維持しつつ、全機能を無効化した場合と比較して消費電力を 93%削減する。また、消費電力を重視するシナリオでは、全機能を有効化する構成が最適であることを示す。このシナリオでは、全機能を無効化した場合と比較して検出精度の劣化を F 値で 0.03 に抑えつつ、消費電力を 89%削減する。

2. 関連研究

本章では、測位処理を省電力化する関連技術として、移動検出機能[4][5]、間隔可変測位機能[2][6][7]、測位手段切替機能[8][9][10]について述べる。特に、継続監視技術と入圏検知技術における要件の違いに着目し、入圏検知技術に利用可能な方式を選定する。

移動検出機能[4][5]は、加速度センサを用いて移動と静止の状態を検知し、移動中にのみ測位を実施することで消費電力を削減する。例えば、文献[4]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静止判定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とサンプリング間隔を変更することにより省電力化を図る。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[11]ため、静止中に CPU をスリープ状態とすることで大幅な消費電力の削減が可能となる。文献[5]も、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。このような移動検出機能は入圏検出技術として利用できるため、本稿では、移動検出機能をジオフェンシングシステムの構成要素として採用する。

間隔可変測位機能[2][6][7]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[6][7]は、継続監視を目的とした間隔可変測位方式である。方式[6]は、カルマンフィルタにより GPS のノイズ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[7]は、アプリケーションが設定した最大誤差や推定し

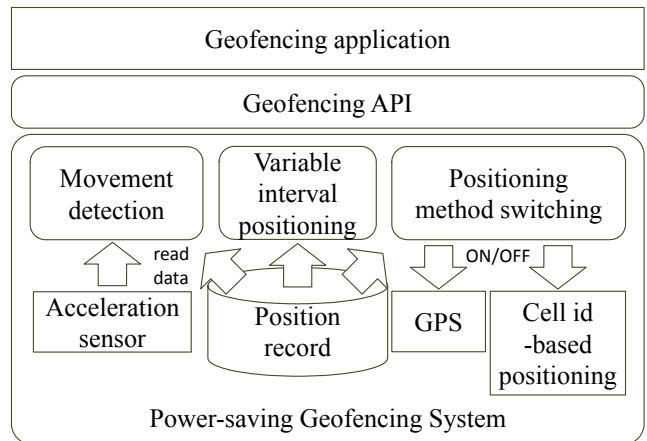


図 1. ジオフェンシングシステムの構成

た移動速度等に応じて測位間隔を調整する。これらの方式は、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。一方、入圏判定を想定した間隔可変測位方式[2]では、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、最も近い監視スポットまでの距離に応じて測位間隔を決定する。本稿では、入圏検出を目的とした文献[2]の方式をシステムの一部を構成する要素技術として組み込む。

測位手段切替機能[8][9][10]は、複数の測位技術を状況に応じて併用あるいは切替えて利用することにより、検出精度や消費電力の削減する。継続的測位を目的とした測位手段切替機能[8][9]は、環境に依存せず測位可能な基地局測位を GPS 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。これに対して、入圏検出を目的とした測位手段切替機能[10]では、監視スポット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する。本稿では、入圏検出に適用可能な文献[10]の方式を採用する。

3. センサ統合型ジオフェンシング

3.1 システム構成

入圏検出に適した移動検出機能[5]、間隔可変測位機能[2]、測位手段切替機能[10]を組み合わせることで、省電力なジオフェンシングを実現するセンサ統合型のジオフェンシングシステムを構成する(図1)。ジオフェンシングアプリケーションは、監視スポットの位置や半径等の情報を Geofencing API によりシステムに通知し、監視スポットへの入圏の検出を開始する。システム内の各機能はいずれも消費電力を削減する効果があり、全てを組み合わせることにより省電力効果が最大となる。

これらの3つの機能による省電力効果は、移動状況や監視スポットの配置によって異なる。移動検出機能は、静止中の消費電力を削減するため、その効果は静止時間の長さ依存する。間隔可変測位機能および測位手段切替機能は、

いずれも監視スポットまでの距離に応じて測位間隔を調整するため、省電力効果は監視スポットの密度に依存する。

3.2 入圏検出アルゴリズム

各機能を併用してセンシングに利用するセンサや測位手段を動的に有効化し、さらにデータ取得間隔を調整することで、省電力性能と検出精度において各機能の相乗効果を生むことができる。図2に、移動検出機能、間隔可変測位機能、測位手段切替機能を組み合わせた入圏検出のアルゴリズムを示す。

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センシング間隔は 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} を大きくするほど加速度センサによるセンシング間隔が大きくなり、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、測位手段切替機能 (Positioning method switching) 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、間隔可変測位により測位間隔を決定する。

間隔可変測位機能 (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、測位間隔を $T = D_{min}/V_{max}$ 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。

3.3 省電力効果と検出精度のトレードオフ

ジオフェンシングシステムの各機能を有効化または無効化した場合における、監視スポットに対する移動状況とシステムの動作の関係を図3に示す。各機能について、移動検出機能、間隔可変測位機能、測位手段切替機能の順に、有効化および無効化した状態を、それぞれ ON もしくは OFF と記載する。例えば、OFF_OFF_ON は、測位手段切替機能のみが有効化された状態を示す。また、監視スポットに対する移動状況として、監視から離れた場合 (Far) と監視スポットに近い場合 (Near)、および、端末が静止している場合 (Staying) と移動中の場合 (Moving) の組合せによる4つの状態を示す。各状態における測位やセンシングに要する消費電力を円の大きさと示し、センシングの間隔を円の間の長さで示す。各機能を有効化するに従って、消費電力が削減される傾向が確認できる。

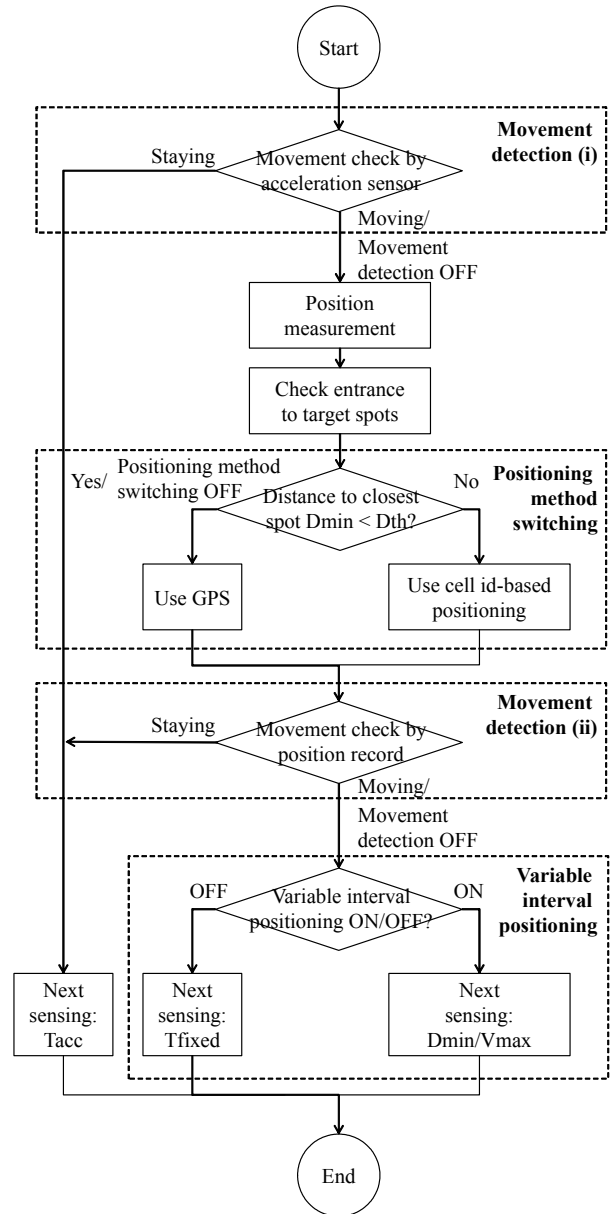


図2. 入圏検出アルゴリズム

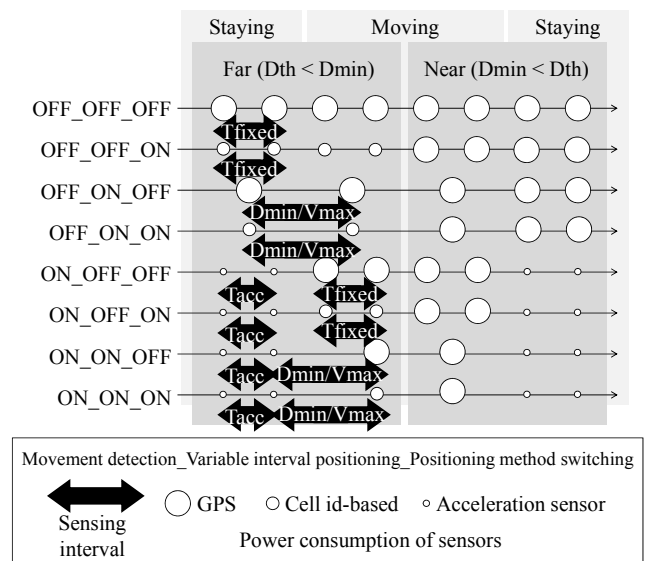


図3. 監視スポットに対する移動状況とシステムの動作

4. 評価

本章では、評価において用いた移動モデルおよび監視スポットの配置のシナリオを示す。次に、各機能を単独で利用した場合における性能を評価する。さらに、各機能を有効化もしくは無効化した場合の性能を評価し、各シナリオにおけるシステムの最適構成を示す。

4.1 移動モデル

現実的な移動状況を模擬するため、Weighted Waypoint 移動モデル[11]を、広域と狭域の移動に適用して組み合わせた階層的な移動モデルに拡張した(図4)。Weighted Waypoint 移動モデルは、特定の場所の間を遷移確率行列に従って移動することにより、日常生活における定型性を反映した移動モデルである。但し、移動範囲は学内のように単独の滞在エリアのような狭域を想定している。

拡張した移動モデルにおいて、端末は自宅や職場等、複数の滞在エリア間を広域で移動し、特定の滞在エリア内の狭域では複数の滞在スポット間を移動する。滞在エリアは自宅エリア(Home area)、職場エリア(Workplace area)、その他のエリア(Other area)の3種類があり、いずれも半径1kmの円形の領域とする。初期位置は自宅エリアとし、確率 p で職場エリア、 $1-p$ でその他のエリアに移動する。職場エリアからは確率 p で自宅エリアに移動し、 $1-p$ でその他のエリアに移動する。

自宅エリアはシミュレーション領域の中央に設定する。職場エリアはランダムな位置に設定し、1回のシミュレーションの試行中は固定の位置とする。その他のエリアは、新しい滞在エリアへの移動の度にランダムに設定する。滞在エリア内では、中心に滞在スポットを配置し、滞在エリアの周囲に滞在スポットを均等に配置する。中心と周囲の滞在スポット間の遷移確率 p は0.7とした。また、滞在エリア内の滞在スポット数 N_s は5とした。

滞在エリアの滞在時間は正規分布に従い、新しい滞在スポットに到着した際に設定した滞在時間を経過すると別の滞在エリアへ移動する。狭域の移動も同様であり、滞在時間を経過する度に滞在スポット間を移動する。滞在エリアにおける滞在時間の平均は8時間、標準偏差は2時間とした。また、滞在スポットにおける滞在時間の平均は2時間、標準偏差は1時間とした。但し、滞在時間が負の値となった場合には、滞在時間を0とみなし、滞在せずに次の監視スポットに移動する。

4.2 監視スポットの設定

評価のシナリオとして、検出精度重視の低密度シナリオと省電力性能重視の高密度シナリオの2つを設定する。

低密度シナリオでは、日常生活におけるリマインドのユースケースを想定し、低密度で大型の監視スポットを配置する。このシナリオは、ユーザが自分自身で能動的に監視スポットを設定する状況を想定している。

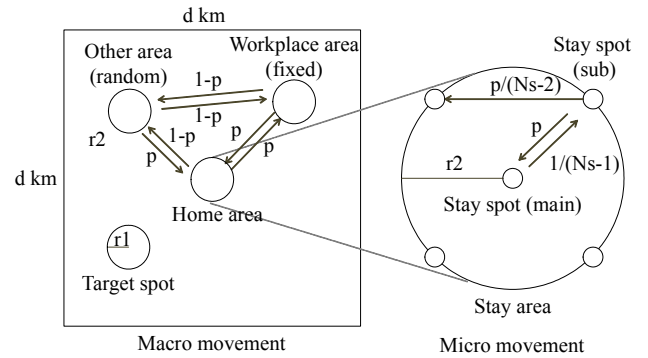


図4. 階層型 Weighted Waypoint 移動モデル

表1. シミュレーション環境のパラメータ

パラメータ	説明	値
D	シミュレーション領域の一辺の長さ	200km
r1	滞在エリアの半径	1km
P	定常的な経路で移動する確率	0.7
Ns	各滞在エリア内の滞在スポットの数	5
Nts	監視スポットの数	A: 10~100 B: 100~1000
r2	監視スポットの半径	A: 1km B: 100m
Tr	発火抑止期間	2時間

A: 低密度シナリオ (リマインドのユースケース)

B: 高密度シナリオ (レコメンドのユースケース)

このため、スポット数は比較的少数とし、10から100の間でランダムに設定する。また、入圏検知の通知を受けた場合に、スポットを設定した地点までである程度の距離を移動する動機があることを前提とし、監視スポットの半径は比較的大きい1kmとする。

高密度シナリオでは、他者からのレコメンドのユースケースを想定し、高密度で小型の監視スポットを配置する。ユーザが登録した第三者からの通知を受けて受動的に監視スポットを設定する状況を想定するため、スポット数は比較的多数の100から1,000の間でランダムに設定する。また、監視スポットへ移動する動機が低い前提とし、監視スポットの近傍で検知して移動距離を短くするため、半径は比較的小さい100mとする。

監視スポットへの入圏の頻繁な検知を回避するため、発火後は抑止期間 Tr の間、検知を抑止する。発火抑止期間 Tr は2時間とした。発火した監視スポットに対しては、抑止期間経過時に測位処理を行う。

4.3 測位精度および消費電力のパラメータ

各測位技術における測位誤差は正規分布に従うこととし、各測位処理毎に誤差を加えた地点の位置情報を取得する。GPSの測位誤差は平均値0m、標準偏差5mの正規分布に従うこととする[1]。これは、測位結果の95%が半径10m以内の誤差を持つことを意味する。また、基地局測位の測位誤差は、平均値0km、標準偏差2.5kmの正規分布に従うこととする[1]。

センシングに伴う消費電力は、文献[1][10][12]に記載の値を利用して設定した(表2)。表2はいずれも各センサにおける1回あたりの消費電力であり、システムが動作することに伴うベースラインの消費電力と、加速度センサやGPS等によるセンシングに伴う消費電力を加えて算出した。シミュレーション結果として得た加速度センサ、基地局測位、およびGPSにおけるセンシング回数と、表2に記載の消費電力より、消費電力の合計値を計算する。

4.4 評価結果

移動検出機能のみを有効化し、加速度センサによるセンシング間隔 T_{acc} を変化させた際の消費電力および検出精度を図5に示す。検出精度は、検出の網羅性を示す再現率(recall)および検出の正確さを示す適合率(precision)の調和平均として定義されるF値で示している。F値は0から1までの値を取り、大きいほど検出精度は高い。1回あたりのシミュレーション時間は24時間とし、1,000回の試行結果の平均値により結果を示している。

移動検出機能を無効化した場合(OFF)と比べて、センシング間隔 T_{acc} が10分の場合、各シナリオにおける検出精度の劣化を0.05未満に抑えつつ、消費電力を約80%削減している。移動検出機能の効果は静止時間に依存するため、各シナリオの消費電力はほぼ同じ結果となっている。

間隔可変測位機能の評価結果を図6に示す。端末の想定最大速度 V_{max} が100km/hの場合、検出精度の劣化を0.05未満に抑えつつ、間隔可変測位機能を無効化した場合(OFF)と比べて、低密度シナリオで消費電力を82%、高密度シナリオで53%削減している。低密度シナリオの方が高密度シナリオよりも省電力効果が高い理由は、間隔可変測位機能において、監視スポットまでの距離に応じて測位間隔が調整されるためである。

測位手段切替機能の評価結果を図7に示す。測位手段切替の閾値 D_{th} が10kmの場合、検出精度の劣化を0.05未満に抑えつつ、低密度シナリオで消費電力を54%、高密度シナリオで12%削減している。高密度シナリオでは、監視スポットが近隣に存在する時間が長いいため、省電力効果は限定的となっている。

次に、シナリオに応じた最適なシステム構成を明らかにするため、各機能をそれぞれ有効化または無効化した8つの組合せを評価した。各機能を有効化する際のパラメータは、検出精度の劣化を5%未満に抑制することを基準とし

表2. センシング処理に要する消費電力(1回あたり)

パラメータ	値
GPS 測位	1.072mAh
基地局測位	0.162mAh
加速度センサ	0.102mAh

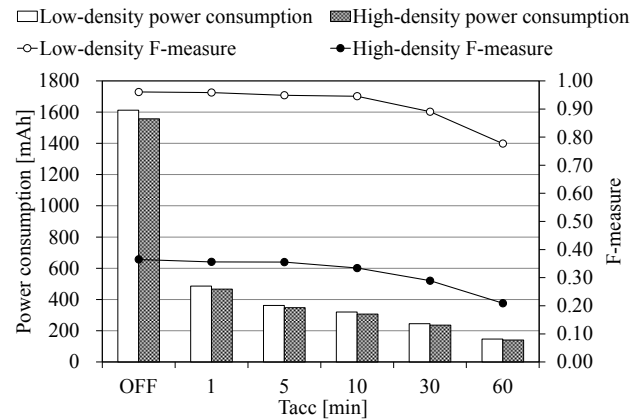


図5. 移動検出機能の性能への貢献度

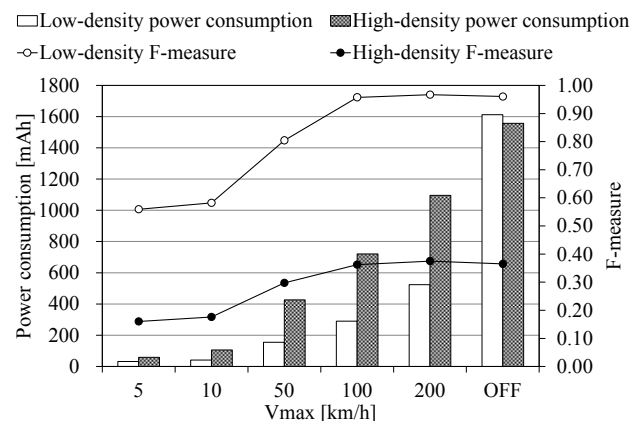


図6. 間隔可変測位機能の性能への貢献度

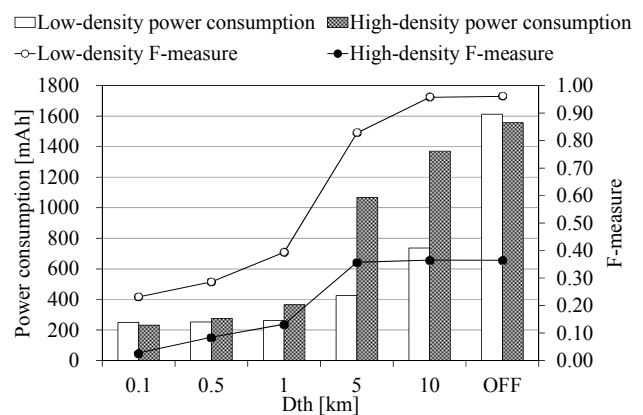


図7. 測位手段切替機能の性能への貢献度

て、センシング間隔 T_{acc} を10分、想定最大速度 V_{max} を100km/h、測位手段切替の閾値 D_{th} を10kmとした。

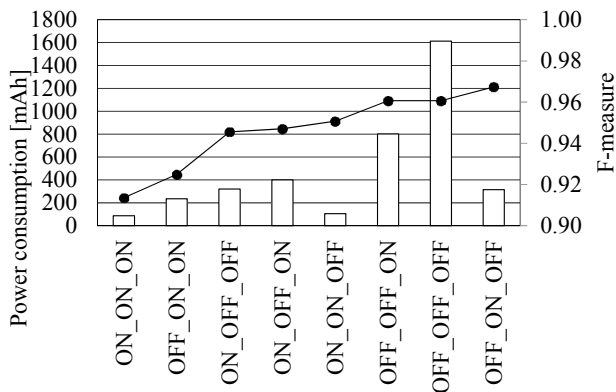


図 8. 低密度シナリオにおける検出精度および消費電力

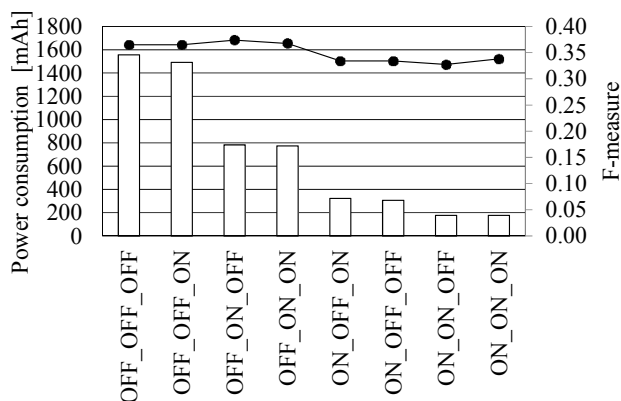


図 9. 高密度シナリオにおける検出精度および消費電力

低密度シナリオでは、検出精度を重視するため、その昇順で結果を示す(図 8)。移動検出機能と間隔可変測位機能を有効化した場合(ON_ON_OFF)、F 値で 0.95 と高い検出精度を維持しつつ、全機能を無効化した場合(OFF_OFF_OFF)と比較して、消費電力を 93%削減している。

高密度シナリオでは消費電力を重視するため、消費電力の降順で結果を示す(図 9)。検出精度はどのシステム構成でも F 値で 0.35 前後であり、全機能を有効化するシステム構成が最適である。なお、高密度シナリオでは検出精度に対する要求は低く、許容できる水準と考える。各機能を有効化した場合、全てを無効化した場合と比較して、消費電力を 89%削減でき、検出精度の劣化は F 値で 0.03 に留まる。

5. おわりに

本稿では、監視スポットへの入圏を検出するジオフェンシングシステムについて、典型的な 2 つのシナリオにおいて最適な構成を明らかにした。既存の測位に関する省電力化技術から、入圏検出に適用可能な技術として、移動検出機能、間隔可変測位機能、測位手段切替機能を選定し、各機能を連携して動作させるアルゴリズムを示した。その上で、ジオフェンシングの典型サービスの要求条件に基づく

評価シナリオとして、低密度シナリオと、高密度シナリオを設定し、各シナリオにおける性能を評価した。評価結果より、検出精度を重視する低密度シナリオでは、移動検出機能と間隔可変測位機能を有効化したシステム構成が適しており、F 値による検出精度を 0.95 と高く維持しつつ、全機能を無効化した場合と比較して、消費電力を 93%削減することを示した。また、消費電力重視の高密度シナリオでは、全機能を有効化した場合が最適であり、全機能を無効化した場合とほぼ同じ検出精度を維持しつつ、消費電力を 89%削減することを示した。今後の課題として、実機への実装により、フィールドテストを通じて提案システムの有効性を検証したい。

参考文献

- 1) Bareth, U.: Privacy-aware and Energy-efficient Geofencing through Reverse Cellular Positioning, Proc. IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2012), pp.153–158 (2012).
- 2) 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).
- 3) Martens, J. and Bareth, U.: A declarative approach to a user-centric markup language for location-based services, Proc. ACM International Conference on Mobile Technology, Application & Systems, No.38 (2009).
- 4) Lee, C., Lee, M., and Han, D.: Energy-efficient Location Logging for Mobile Device, Proc. IEEE International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2010), pp.84-90 (2010).
- 5) Chon, Y., and Cha, H.: LifeMap: a smartphone- Based Context Provider for Location-Based Services, IEEE Pervasive Computing, Vol.10, Issue. 2, pp.58–67 (2011).
- 6) 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).
- 7) Kjærgaard, B.M., Langdal, J., Godsk, T., and Toftkjær, T.: EnTracked: Energy-Efficient Robust Position Tracking for Mobile Devices, ACM MobiSys 2009, pp.221–234 (2009).
- 8) 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).
- 9) Soliman, S., Agashe, P., Fernandez, I., et al.: gpsOne TM: A hybrid position location system, in Proc. International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Vol. 1, pp. 330–335 (2000).
- 10) 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).
- 11) Priyantha, B., Lymberopoulos, D., and Liu, J.: LittleRock: Enabling Energy- Efficient Continuous Sensing on Mobile Phones, IEEE Pervasive Computing, pp. 12–15 (2011).
- 12) 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).
- 13) Wang, Y., Lin, J., Annavam, M., et al.: A framework of energy efficient mobile sensing for automatic user state recognition, Proc. ACM MobiSys 2009, pp. 179–192 (2009).