

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

中川 智尋^{1,2,a)} 太田 賢¹ 稲村 浩¹ 鈴木 誠² 森川 博之²

受付日 2014年4月6日, 採録日 2014年10月8日

概要: 本論文では, スマートフォンにおいてジオフェンシングサービスを省電力に実現する技術として, 端末の進行方向を考慮した間隔可変測位方式を提案する. 従来の間隔可変測位方式では, 端末の進行方向を考慮しないため省電力性能に制約があった. 監視スポットに対する移動方向に対する閾値を設定して測位間隔を調整する方式も考えられるが, 端末が監視スポットから逸れた方向に移動すると測位間隔が過度に大きくなり, 検出漏れとなる問題がある. これに対して, 提案方式では, 監視対象の領域に対する端末の進行方向と端末の移動速度から「接近速度」を連続的に算出する. 提案アルゴリズムにより, 端末の移動方向が監視スポットから逸れるに従って測位間隔を広げることで消費電力を抑制するとともに, 端末が移動している際の方向変化への耐性を確保する. 50人分の約2カ月間のGPS履歴から生成した移動軌跡データを用いたシミュレーションにより, 従来の間隔可変測位方式と比較して, 監視スポットが滞在点の近辺に存在するシナリオにおいて, 検出精度の劣化を発生させずに測位回数を29%改善できることを示す.

キーワード: 省電力ジオフェンシング, スマートフォン, 進行方向を考慮した間隔可変測位

Direction-based Variable Interval Positioning Method for Power-saving Geofencing Services

TOMOHIRO NAKAGAWA^{1,2,a)} KEN OHTA¹ HIROSHI INAMURA¹ MAKOTO SUZUKI²
HIROYUKI MORIKAWA²

Received: April 6, 2014, Accepted: October 8, 2014

Abstract: We propose a variable interval positioning method which utilizes the terminal's moving direction for smartphone-based geofencing services. Previous work of variable interval positioning method suffers from high battery consumption due to excessive position measurements. Naïve approaches, which utilize threshold of terminal moving direction to decide positioning interval, also fall short in high detection accuracy due to overlong positioning interval in case the terminal deviates from the target spot. The proposed method solves this problem by adjusting appropriate positioning interval according to the terminal's moving direction. The proposed algorithm calculates the terminal's "access speed" as continuous value by using the terminal's speed and the angle between the terminal's moving direction and the target spot's direction. The mechanism of the proposed method enables tolerance against the change of terminal's moving direction. The simulation results based on real GPS log shows that number of position fixes is reduced by 29% without degradation of detection accuracy.

Keywords: power-saving geofencing, smartphone, variable interval positioning based on moving direction

¹ 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

² 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

1. はじめに

GPS や基地局測位等の測位機能を搭載したスマートフォンが普及し, 位置情報を活用したサービスが提供されている. 位置連動型サービスの重要な要素技術として, ジオ

フェンシングが注目を集めている。ジオフェンシングとは、地図上に監視対象の領域（以下では監視スポットと呼ぶ）を設定し、その境界をユーザが越えたことを検知する技術である。ジオフェンシングにより監視スポットに対する出入圏を検知して、あらかじめ決められた処理を自動的に実行することにより、適切な情報やサービスを提供することが可能となる。たとえば、日常生活におけるリマインドや、子供の見守りや盗難防止等の安心安全サービス、ターゲティング広告等広い応用が期待される [1]。

スマートフォンにおけるジオフェンシングを実現するには、消費電力の低減と高精度な検知の両立が課題となる。ユーザは滞在と移動を繰り返し、移動中にも速度や方向が変化する。このため、消費電力の低減を目的として測位間隔を大きくすると、端末の現在地や移動方向に関する正確な情報が入手できなくなる。端末の移動速度にかかわらず固定の周期で位置情報を取得する定期測位方式では、高精度な入圏検知を行うためには常時高頻度な測位処理が必要となる。これに対して、間隔可変測位方式と呼ばれる、位置情報のサンプリング周期を可変とする方式を利用することで、測位処理にかかる消費電力を削減することができる。

ジオフェンシングのための間隔可変測位方式として、監視スポットの周辺に誤差耐性領域を設定する方式 [2] がある。この方式では、端末は事前に設定した想定最大速度で任意の方向へ移動すると仮定し、監視スポットへの入圏時刻を推定して測位間隔を決定する。これにより、測位誤差への耐性を確保しつつ、測位契機を削減して消費電力を低減させる狙いがある。しかし、この方式は端末の移動方向を考慮しておらず、さらに省電力化する余地があると考えられる。

本論文では、監視スポットに対する端末の移動方向に応じて算出した「接近速度」を用いて測位間隔を決定する間隔可変測位方式を提案する。移動方向を考慮した間隔可変測位方式として、移動方向の閾値を超えた場合に測位間隔を上限値とする方式が考えられる。この方式では、端末が監視スポットから逸れた方向に移動すると測位間隔が過度に大きくなるため、端末の移動方向が監視スポットに向けて変化した場合に検出漏れとなるという問題がある。この問題に対応するため、提案方式では、監視スポットの方向と端末の進行方向のなす角度と移動速度から接近速度を連続的に算出する。これにより、端末の移動方向が監視スポットから逸れるに従って測位間隔を広げることで消費電力を抑制するとともに、端末が移動している際の方向変化への耐性を確保する。GPS 履歴を用いた現実的な移動軌跡データを用いたシミュレーションにより提案方式を評価した結果、提案方式では、監視スポットが散在するシナリオにおいて、検出精度の劣化を発生させることなく、3つの比較対象方式のうち最も高い性能を示した想定最大速度利用方式と比較して測位回数を 29%改善する効果が確認された。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- 移動方向の閾値を用いて測位間隔を調整する簡易な間隔可変測位方式における問題点を示した。
- 端末の移動方向の変化への耐性を備えた省電力間隔可変測位アルゴリズムを提案した。
- 現実的な移動軌跡データによるシミュレーションにより、3種類の間隔可変測位方式と提案方式を評価し、提案方式の有効性を示した。

本論文の構成を以下に示す。2章では、ジオフェンシングに適用可能な関連研究を示し、既存の間隔可変測位方式の問題点を述べる。3章では、端末の移動方向に着目し、監視スポットへの接近角度の閾値を用いた間隔可変測位方式について問題を分析する。4章では、この分析をふまえて間隔可変測位方式の要件を定義し、測位間隔の連続性を特徴とする方式を提案する。5章では、実際のユーザのGPS履歴を用いた現実的な移動軌跡データによるシミュレーションにより提案方式の有効性を示す。最後に、6章で結論を述べる。

2. 関連研究

本章では、まず、ジオフェンシングを省電力化するための関連研究として、加速度センサやGPS測位、基地局測位を組み合わせる移動検出技術 [3], [4] および測位手段切替え技術について述べる。次に、ジオフェンシングにおける測位処理を効率化する関連技術として、間隔可変測位技術について述べ、既存の間隔可変測位方式の制約や問題点を説明する。

移動検出技術 [3], [4] は、加速度センサを用いて端末が移動中か否かを判定する。システムの起動中における消費電力はスリープ状態と比較して数百倍の消費電力である [5]。このため、スリープ状態を長時間維持することは、消費電力の削減につながる。加速度センサの消費電力は測位処理にともなう消費電力よりも小さいため、移動検出を短時間で実施し、静止中の測位処理を抑制することにより、消費電力を大幅に抑制できる。

測位手段切替え技術 [1], [7], [8] は、監視スポットが離れている場合等、測位誤差が許容できる場合に消費電力の小さい基地局測位を利用する。GPSと基地局測位では測位誤差と消費電力がトレードオフの関係にあるため [6]、監視スポットまでの距離に応じて適切な測位手段を利用することが望ましい。

これらの技術は、いずれもジオフェンシングサービスを実現するうえで、本論文で取り組む間隔可変測位技術とは互いに相補的であり、組み合わせてシステムを構成することができる。以下では、本論文において取り組む間隔可変測位方式 [2], [6], [9], [10], [11] について述べる。

従来の間隔可変測位方式の多くは、ナビゲーションやトラッキングを目的としており、ジオフェンシングとは異なる

る要件に基づいて検討されている [6], [10], [11]. ナビゲーションやトラッキングの要件は, 継続的に端末の位置を取得し, つねに現在地を取得できることである.

これに対して, ジオフェンシングにおける入圏検知の要件は, 監視スポットまでの距離を考慮して, より少ない測位処理により監視スポットへの入圏を検知することであり, 現在値を継続的に取得する必要はない. 方式 [10] は, 細粒度での位置取得によるユーザのトラッキングを目的としており, ジオフェンシングでは不要な経路上の位置履歴を取得する. 個人の習慣的な移動傾向を利用して省電力で位置を特定する方式 [6] は, 習慣的な移動経路から離れた場合の経路を, 多数の他人の移動経路を統計処理して推定している. この方式では, 監視スポットへの入圏の検出精度が, 経路の予測精度に大きく依存するという問題がある. 方式 [11] は, カルマンフィルタを用いて GPS の測位誤差を除去することにより, 端末の移動速度の推定精度を向上させる. 端末の速度が頻繁に変化する状況では高頻度な測位処理が必要となり, ジオフェンシングには適用できない.

ジオフェンシングサービスへの適用が可能な間隔可変測位方式 [2], [9] もあるが, 端末の移動方向を考慮していないため, 省電力性能に制約がある. 監視スポットの周辺に誤差耐性領域を定義する方式 [2] では, 端末の移動方向にかかわらず, 想定最大速度で監視スポットに近づくとして測位間隔を設定する. これにより, 検出漏れや誤検出が誤差耐性領域内でのみ発生することを保証する. センシングと位置情報の送信頻度を動的に変更することにより消費電力を抑制する方式 [9] では, 移動端末が線形の移動パターンに従うという仮定をおいており, 移動方向の変化を正しく検知するには測位間隔を短くする必要があり, 検出漏れの防止と省電力化を両立させることが難しい. 最大速度の最適値を推定する方式 [12] も検討されているが, 端末の速度を固定値とするため, 消費電力の抑制効果は限定的である.

3. 移動方向の閾値を用いる方式の問題

本章では, ジオフェンシングサービスに適した間隔可変測位方式として, 端末の移動方向の閾値を用いて測位間隔を決める 2つの方式を検討する. 監視スポットを基準とした端末の移動方向について閾値を設けることにより, 閾値を超えた場合に測位頻度を抑制する. 第1の方式は, 監視スポットの周囲に設定した移動耐性領域を基準として閾値を変更する閾値変動方式である. 第2の方式は, 監視スポットに対する進行方向に対して固定の閾値を設ける閾値固定方式である. いずれの方式においても, 端末の想定移動速度 V_{max} が既知であると仮定し, V_{max} を用いて測位間隔を決定する.

閾値変動方式において測位間隔を設定する方法を図 1 で説明する. 監視スポットの周囲に移動耐性領域が設定されており, 端末は監視スポットに対して接近角度 θ で移動し

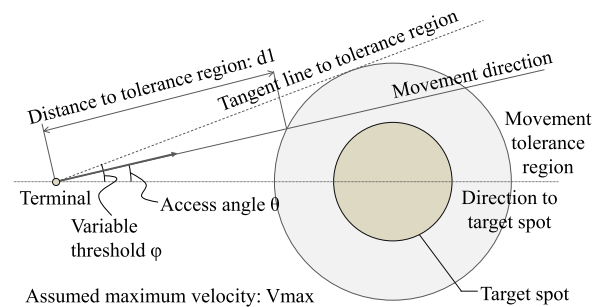


図 1 閾値変動方式における測位間隔の設定方法
Fig. 1 Parameters for variable threshold method.

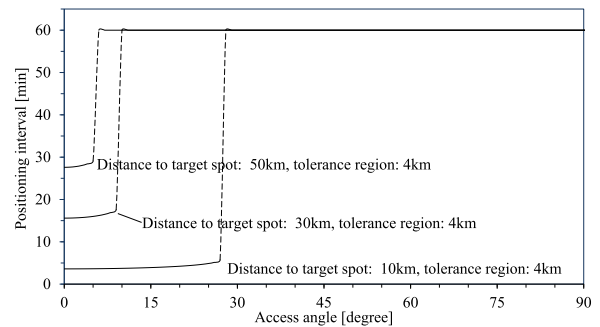


図 2 閾値変動方式における測位間隔
Fig. 2 Positioning interval by variable threshold method.

ている. ここで, 接近角度 θ は, 監視スポットの方向と端末の移動方向のなす角である. 端末が直線運動により移動すると仮定し, 端末の現在地から, 端末の移動方向に延ばした直線と移動耐性領域の交点までの移動距離を d_1 とすると, 測位間隔は d_1/V_{max} と設定される. 端末の現在地から誤差耐性領域への接線と監視スポットの方向のなす角を φ とすると, 接近角度 θ が閾値 φ を超えた場合, 端末は監視スポットに到達しないと見なされ, 測位間隔を上限値とする. この上限値は, 端末が移動方向を変化させて監視スポットに入圏することに備えて, 一定時間の経過後に測位を行うために設定する.

閾値変動方式では, 端末が監視スポットから離れている場合, 測位間隔を大きく設定することにより検出漏れが発生しやすい. 閾値変動方式における接近角度と測位間隔の関係を図 2 に示す. この図では, 監視スポットの半径を 1 km とし, 移動耐性領域を 4 km としている. 監視スポットまでの距離が 10 km の場合, 接近角度が約 $\pi/6$ で測位間隔は上限値の 60 分となる. このため, 端末が $\pi/6$ よりも大きな接近角度で監視スポットの方向に向かうと検出漏れの原因となりうる. この測位間隔の不連続な変化は, 監視スポットまでの距離が遠い場合, より小さな接近角度で発生する. 監視スポットまでの距離が 30 km の場合, 接近角度が約 $\pi/18$ で測位間隔は上限値となる. したがって, 監視スポットが離れている場合ほど, 監視スポットから少しでも逸れた方向に進むと適切に測位間隔を設定できず, 検出漏れの原因となる.

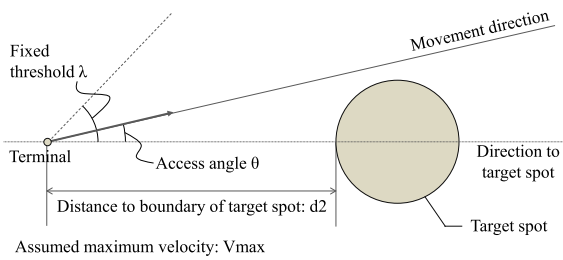


図 3 閾値固定方式における測位間隔の決定方法
Fig. 3 Parameters for fixed threshold method.

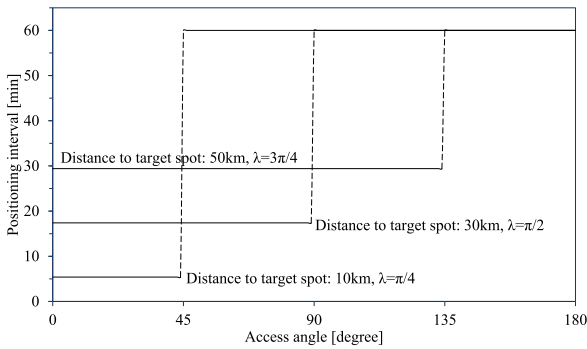


図 4 閾値固定方式における測位間隔

Fig. 4 Positioning interval by fixed threshold method.

閾値固定方式において測位間隔を設定する方法を図 3 に示す。閾値固定方式では、接近角度 θ が閾値 λ を超えた場合に測位間隔が上限値となる。ここで、閾値 λ は 0 から π の間の固定値とする。接近角度 θ が閾値 λ を下回る場合は、監視スポットの境界までの距離 $d2$ と、想定最大の移動速度 V_{max} を用いて、測位間隔を $d2/V_{max}$ とする。この方式では、端末が監視スポットから逸れた方向に移動している場合でも、接近角度が閾値 λ 以内であれば測位間隔は短く設定される (図 4)。

閾値固定方式は、監視スポットからの距離が離れた場合における検出漏れの問題を回避できるが、端末の移動方向の変化への耐性は十分ではない。接近角度 θ が閾値 λ を超えた場合、測位間隔は上限値となり、検出漏れにつながる可能性がある。また、閾値 λ を大きくすることにより検出漏れを抑制できるが、その場合、進行方向にかかわらず短い測位間隔が設定されるため、消費電力を低減させることができない。

このように、端末の移動方向を考慮した方式として移動方向の閾値を設定する方式が考えられるが、いずれの方式も、端末の移動方向の変化がある環境では、検出精度と消費電力の低減を両立させることが困難と考えられる。

4. 進行方向を考慮した接近速度算出方式

前章の議論をふまえて、本論文では、端末側の移動方向の変化を考慮して接近速度を算出する方式を提案する。提案方式では、端末が監視スポットから逸れた方向に進行している場合でも、接近角度に応じた測位間隔を維持し、検

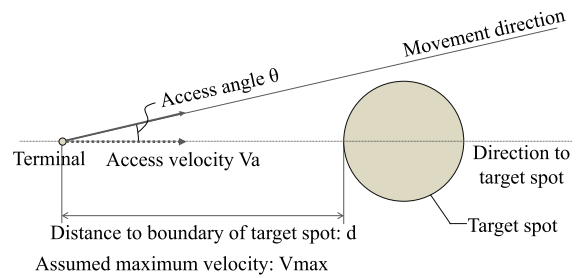


図 5 接近速度算出と測位間隔決定に用いるパラメータ

Fig. 5 Parameters for calculating access speed and positioning interval.

出精度の劣化を防止する。3章で述べた閾値変動方式および閾値固定方式は、接近角度が大きい場合に測位間隔が不連続に上限値となる。これは、監視スポットへの到達が予測されるまでの時間を適切に計算できず、次回までの測位時間が上限値となることを意味しており、検出漏れの原因となる。

提案方式では、現在地から監視スポットの境界までの距離 d を監視スポットに対する接近速度 V_a で除し、測位間隔を d/V_a とする (図 5)。ここで、接近速度 V_a は、端末の想定最大速度 V_{max} と接近角度 θ の関数として定義する。なお、端末の移動方向は、過去の 2 回の測位結果に基づいて算出する。

接近速度 V_a を規定するにあたり、接近角度 θ および想定最大速度 V_{max} との関係について下記の条件を満たすことを要件とした。

- 要件 1: 接近角度 $\theta = 0$ の場合に $V_a = V_{max}$ となる。
- 要件 2: V_a は θ に対する単調減少関数である。
- 要件 3: V_a は θ に対する連続関数である。

各要件を満たすことにより、端末の進行方向の変化に対して検出漏れを発生させないための耐性を確保する。要件 1 は、端末が監視スポットの方向に向かって進んでいる場合、想定最大速度をそのまま用いることを意味する。要件 2 は、端末の移動方向が監視スポットから逸れるに従って、測位間隔を遅らせることを意味する。要件 3 は、監視スポットから逸れた方向に進んでいる場合でも、測位間隔が不連続に変化して上限値とならないことを意味する。

これらの要件を満たす接近速度 V_a の定義として、全方位モードと方位限定モードの 2 つのモードを持つ接近速度算出方式を定義する。全方位モードは、移動方向の変化への耐性を高めるため監視スポットがどの方向であっても接近速度を 0 としないモードである。方位限定モードは、監視スポットが進行方向から一定の角度以上で逸れた場合に、接近速度を 0 とするモードである。全方位モードおよび方位限定モードにおける接近速度 V_a は、それぞれ以下の式により定義する。

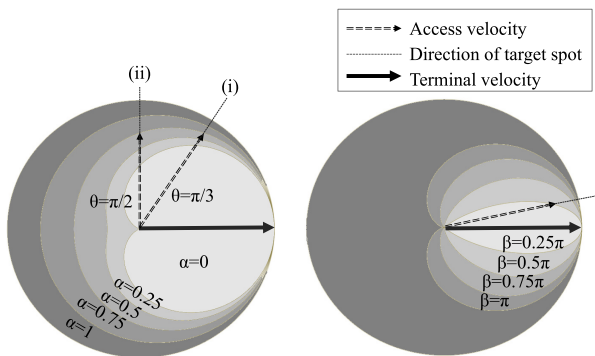


図 6 進行方向を考慮した接近速度の算出 (左: 全方位モード, 右: 方位限定モード)

Fig. 6 Access speed calculation by using moving direction (Left: All round mode. Right: Limited direction mode).

全方位モード:

$$V_a = \left(\frac{1+\alpha}{2} + \frac{1-\alpha}{2} \cos \theta \right) V_{\max} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

方位限定モード:

$$\begin{cases} V_a = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{\beta} \theta \right) V_{\max}, & \text{if } 0 \leq \theta \leq \beta \\ V_a = 0, & \text{if } \beta \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (0 \leq \beta \leq \pi) \quad (2)$$

提案方式では、接近速度の算出において、到達予測時間に対して一定の余裕を確保する。これにより、移動方向の変化への耐性を確保し、入圏の検出漏れを防止する。提案方式におけるパラメータ α , β が大きいほど接近速度は大きく、測位頻度は高くなる。全方位モードにおける α は 0 から 1 までの値であり、端末が監視スポットに対して正反対に移動している際の接近速度が αV_{\max} となるように接近速度を算出する。全方位モードでは、端末の移動方向にかかわらず接近速度は正の値となる。方位限定モードにおける β は接近速度を与える角度であり、0 から π までの間の値をとる。接近角度が β 以上の場合に、接近速度を 0 とする。なお、提案方式は、接近速度を導入することにより、将来の移動方向の変化への耐性だけでなく、移動方向の推定結果の誤差への耐性を備える効果もある。

提案方式における 2 つのモードは、パラメータ α , β を変化させると接近速度を連続的に調整できる。提案方式における接近速度の算出結果の例を図 6 に示す。端末の進行方向が右方向で、監視スポットが点線方向の場合、接近速度 V_a は、点線上に記載した矢印で示された速度となる。全方位モードと方位限定モードの連続性は、 $\alpha = 0$ の場合と $\beta = \pi$ の場合において確保され、この状態における両モードの接近速度は同一となる。全方位モードで $\alpha = 1$ の場合、監視スポットの位置によらず接近速度は想定最大速度 V_{\max} に一致する。また、方位限定モードで $\beta = 0$ に近づくに従い、既存の間隔可変測位方式に近い挙動を

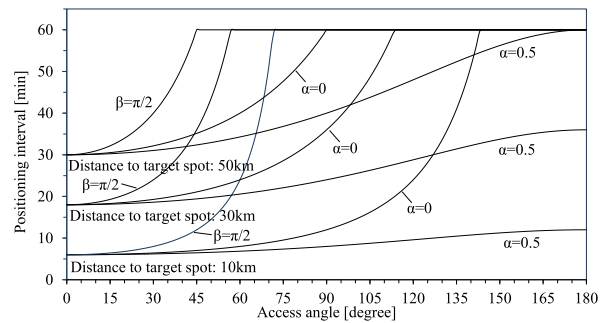


図 7 提案方式における測位間隔

Fig. 7 Positioning interval by the proposed method.

示す。たとえば、全方位モードで $\alpha = 0.5$ の場合、監視スポットに対する接近角度 $\theta = \pi/3$ (図 6 (i)) では接近速度 $V_a = 0.875V_{\max}$ となり、 $\theta = \pi/2$ (図 6 (ii)) では接近速度 $V_a = 0.75V_{\max}$ となる。このように、提案方式では、パラメータ α , β を導入して接近速度を決定することにより、接近角度 θ のみを用いる場合よりも柔軟に検出精度および消費電力を調整できる。

提案方式では、接近速度 V_a は接近角度 θ の連続関数であるため、接近角度 θ が増加した場合に測位間隔が不連続に上限値とならない。測位頻度が過度に高頻度もしくは低頻度にならないようにするため、測位間隔の最大値 T_{\max} および最小値 T_{\min} を定義する。提案方式における接近角度 θ と測位間隔の関係を図 7 に示す。図 7 では、 T_{\min} を 1 分、 T_{\max} を 60 分としている。たとえば、監視スポットまでの距離が 30 km で提案方式のパラメータ $\alpha = 0$ の場合、接近角度 θ の増加にともない測位間隔が連続的に増加し、 θ が 115 度で測位間隔は上限値の 60 分に達する。

複数の監視スポットが存在する場合における次回の測位間隔 T は、以下の式により求める。

$$T = \max\{\min(d_i / V_{a_i}, T_{\max}), T_{\min}\} \quad (3)$$

ここで、 d_i は監視スポット i までの距離、 V_{a_i} は監視スポット i に対する接近速度を示す。端末から各監視スポット i までの距離 d_i および接近速度 V_{a_i} は異なるため、各監視スポットに対して得られた測位間隔の最小値を利用する。

5. 評価

提案方式の有効性を検証するため、ユーザの GPS 履歴から生成した移動軌跡データを用いたシミュレーションにより、測位回数および検出精度を評価した。1 回の試行では、1 人の 24 時間分の移動軌跡を用いて、各方式のパラメータを変更した 34 通りについて、同一の監視スポット数および配置の条件下で評価した。

5.1 GPS 履歴を用いた移動軌跡データ

シミュレーションにおいて利用する移動軌跡データとして、20 代から 50 代の男女を含む 50 人の被験者が約 2 カ月に

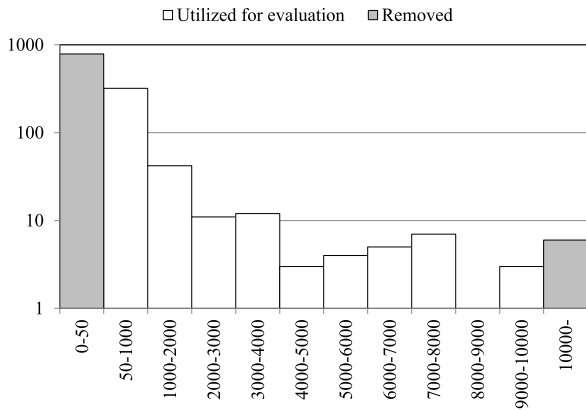


図 8 GPS 履歴データ各サンプルの移動範囲の分布

Fig. 8 Distribution of travel range of GPS data samples.

わたって蓄積した GPS 履歴を用いた。データの取得には、15 秒間隔のサンプリング周期で測位が可能な Transystem 社の GPS ロガー 747Pro を用いた。GPS ロガーを 1 日を通じて携帯して取得したデータは、滞在と移動および速度や移動方向の変化を含み、現実的な移動状況における提案方式の性能を評価できる。シミュレーションの 1 回の試行では、無作為に抽出された 1 人のユーザの 24 時間のシミュレーションを行った。

シミュレーションの実行前の処理として、欠損の多いデータを除外するため、1 日単位で GPS の履歴が 10 時間分に満たないデータを除外した。また、移動範囲が小さいデータや、大きな誤差を含むデータを除去するため、移動範囲が 50 km² 以上 10,000 km² 未満のデータを採用した (図 8)。移動範囲が 50 km² 未満のため除外されたサンプル数は 787 であり、10,000 km² 以上のため除外されたサンプル数は 6 である。採用したサンプルのうち 78% にあたる 320 サンプルの移動範囲が 50 km² 以上 1,000 km² 未満、10% にあたる 42 サンプルの移動範囲が 1,000 km² 以上 2,000 km² 未満であり、残りの 12% は 3,000 km² 以上 10,000 km² 未満の間に分散している。なお、移動範囲は、GPS 履歴に含まれる緯度方向および経度方向の移動距離の積による概算値として算出した。

シミュレーションの実行時には、15 秒間隔の測位履歴に対して線形補間を行い、1 秒単位で移動先を計算して、ユーザの位置の真値とした。データの一部が欠損している場合、欠損部分は等速直線運動と仮定して線形補間した。なお、各方式の測位処理では GPS による測位を行うこととし、位置の真値に対して、GPS の測位誤差を加えた結果を測位結果として与える。GPS の測位誤差は、平均値 0m、標準偏差 3.15m の正規分布に従うとして算出した [13]。

5.2 監視スポット

シミュレーションでは、監視スポットの配置と形状について各 2 種類の設定を行い、合計 4 種類のシナリオにつ

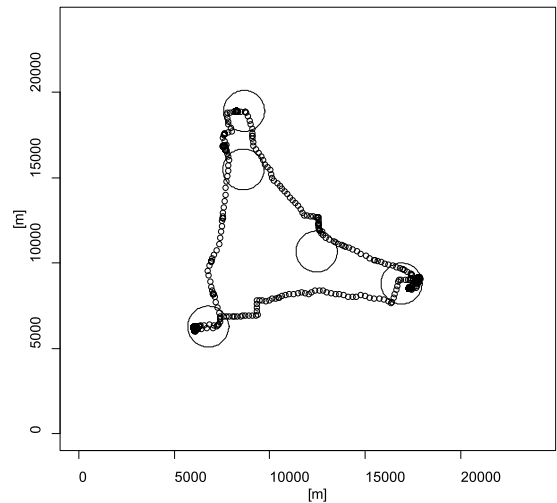


図 9 GPS 履歴と監視スポットの配置 (偏在シナリオ)

Fig. 9 GPS log and allocation of target spots (clustering).

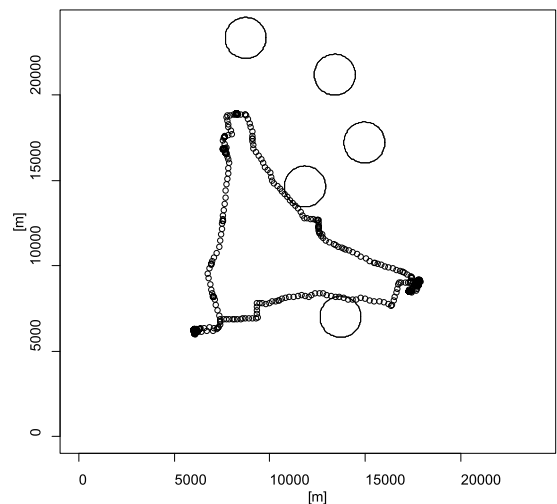


図 10 GPS 履歴と監視スポットの配置 (散在シナリオ)

Fig. 10 GPS log and allocation of target spots (random).

いて評価した。監視スポットの配置については、端末が移動する領域内に監視スポットが偏在するシナリオと、移動する領域に限定せずに散在するシナリオを想定して配置した。また、監視スポットの形状は半径 1km および 100m の円形とした。

監視スポットの配置は、それぞれ異なるユースケースを想定して設定した。偏在シナリオは、監視スポットが滞在時間の長い場所や移動経路の近辺に存在する状況を模擬しており、リマインド等のサービスへの応用を想定している。偏在シナリオでは、図 9 に示すように、監視スポット数をクラスタ数として K-means により GPS 履歴データのクラスタリングを行い、得られた結果を監視スポットの中心とした。散在シナリオは、日常の行動範囲を越えた場所に監視スポットが存在する状況を模擬しており、まれに立ち寄る場所で店舗等をリマインドするサービスを想定している。散在シナリオでは、図 10 に示すように、移動軌跡を

表 1 シミュレーションで用いた各方式のパラメータ
Table 1 Simulation parameters for each method.

方式名	想定最大速度 [km/h]	方式特有のパラメータ
提案方式 (PROPOSED)	100	$\alpha=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ $\beta=\pi/4, \pi/2, 3\pi/4$
最大速度利用方式 (MAX_SPEED)	1, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 150	N/A
閾値固定方式 (FIXED_THRESHOLD)	100	$\lambda=\pi/4, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8, \pi$
閾値変動方式 (VARIABLE_THRESHOLD)	100	$Dtr=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6[\text{km}]$

含む正方形のシミュレーションエリア内において、監視スポットをランダムな場所に設定した。

いずれのシナリオにおいても、監視スポットの数は、シミュレーションの試行ごとに1から10の間でランダムに設定して配置した。各監視スポットに入圏した後、指定した発火抑止期間中は、該当の監視スポットへの入圏の検知を抑止することとする。発火抑止期間は12時間とした。シミュレーションエリアの1辺の長さは、1日のGPS履歴における東西もしくは南北方向の最大の移動距離の2倍とした。散在シナリオでは、約1/4以下の監視スポットが移動軌跡の上に配置され、残りの監視スポットは移動軌跡の周囲もしくは内側に配置される。

5.3 比較方式

端末の進行方向を考慮しない最大想定速度利用方式、3章で述べた進行方向を考慮する閾値変動方式と閾値固定方式、および提案方式の4つの方式について評価する。

最大速度利用方式は、端末の進行方向にかかわらず、つねに最大の想定移動速度 V_{max} で監視スポットに近づくと想定して測位間隔を決定する。これは、既存の間隔可変測位方式 [2] でも採用されている手法である。各方式において利用するパラメータを表 1 に示す。最大速度利用方式では、 V_{max} を 1 km/h から 150 km/h まで変化させる。他の方式では、 V_{max} を 100 km/h で一定とする。なお、測位間隔の最大値 T_{max} は 60 分、最小値 T_{min} は 1 分とした。

5.4 評価結果

各方式の性能を比較するため、測位回数および検出精度を評価した。シミュレーションの試行回数は、監視スポットの半径が 1 km のシナリオについては 500 回とし、半径

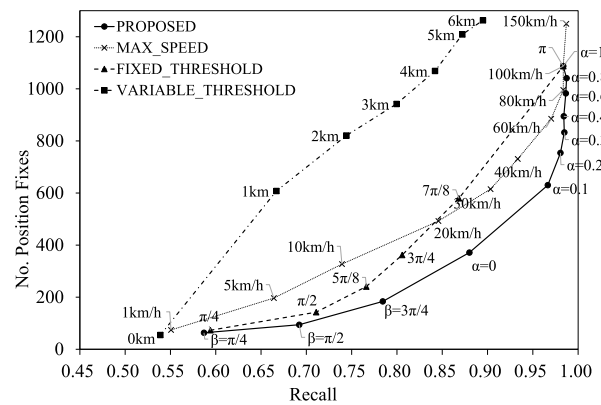


図 11 偏在シナリオにおける性能評価結果 (半径 1 km)
Fig. 11 Evaluation by clustering allocation (radius: 1 km).

が 100 m のシナリオについては入圏の発生回数が少ないため 5,000 回とした。測位回数は、24 時間のシミュレーションにおける GPS 測位の回数である。検出精度は、適合率 (Precision) と再現率 (Recall) を評価した。適合率は、監視スポットへの入圏を検出した回数のうち、端末が監視スポット内に実際に存在した回数の割合である。再現率は、全試行の全入圏回数のうち、入圏を検出した回数の割合である。再現率の悪化は、検出漏れが増加していることを意味する。すべての方式について誤検出は発生せず、適合率は 1.0 であったため、以下では、再現率と測位回数の評価結果を示す。

偏在シナリオにおいて、提案方式は他の 3 つの間隔可変測位方式と比較して、同一の測位回数の場合、最も検出精度が高い結果となった (図 11)。図 11 の横軸は再現率を示し、縦軸は測位回数を示す。最大速度方式で V_{max} が 60 km/h の場合と、提案方式で α が 0.1 の場合を比較すると、提案方式は再現率を 0.97 から劣化させることなく、測位回数を 884 回から 630 回まで約 29% 削減している。

閾値変動方式は、他の 3 方式と比較して、特に検出精度が悪化する結果となった。これは、端末が監視スポットから離れた場合に、測位間隔が上限値となることが起因していると考えられる。移動耐性領域を拡大することにより再現率の改善が見られるが、同時に測位回数が増大している。これは、移動耐性領域の拡大により測位間隔が短くなるためである。

閾値固定方式は、接近角度の閾値 λ が π もしくは 0 に近づくと、提案方式において α が 1 もしくは β が 0 に近づいた場合と同様の特性を示す。 λ が π と 0 の中間の値をとる場合、提案方式と比較して性能が悪化する。閾値固定方式で $\lambda = 7\pi/8$ の場合と、提案方式で $\alpha = 0$ の場合を比較すると、提案方式は検出精度を劣化させることなく、測位回数を 35% 低減させている。

このように、移動方向を考慮する方式において閾値を設けた場合、検出精度の悪化が著しい。また、これらの方式でパラメータの調整により検出精度を改善しようとすると測位回数の増大につながる。

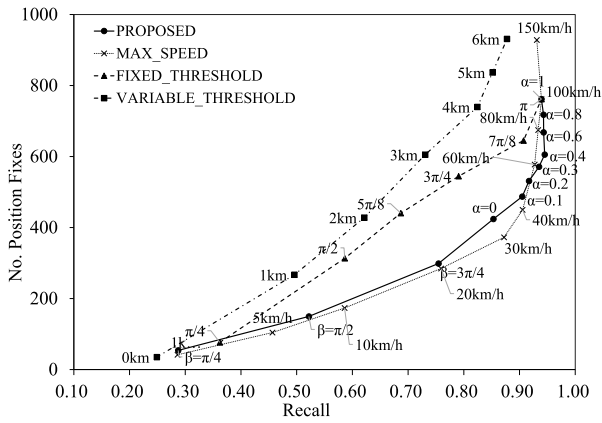


図 12 散在シナリオにおける性能評価結果 (半径 1 km)

Fig. 12 Evaluation by random allocation (radius: 1 km).

最大想定速度利用方式は、提案方式と比較すると、 $V_{max} = 100 \text{ km/h}$ の場合に、提案方式で $\alpha = 1$ の場合と同一の結果となる。最大想定速度利用方式は、 V_{max} の値を下げるとともに再現率が悪化する一方、提案方式は α の値を小さくしても、 $\alpha = 0.2$ 程度までは再現率を維持したまま測位回数を下げている。これは、提案方式において移動方向を考慮して測位間隔を減らした効果といえる。

散在シナリオでは、提案方式は閾値を用いる 2 方式と比較して測位回数を下げる効果が確認されたものの、想定最大速度利用方式とは、ほぼ同じ結果となった (図 12)。偏在シナリオでは、滞在点の近傍や移動経路上に監視スポットが存在する。これに対して、散在シナリオでは、監視スポットは移動経路と独立に配置される。このため、すべての方向を同等に扱う想定最大速度利用方式が性能面で有利になると考えられる。また、偏在シナリオと散在シナリオの測位回数を比較すると、全体として散在シナリオの測位回数の方が小さい。提案方式で $\alpha = 1$ の場合で比較すると、1,086 回から 761 回と 30% 減少している。これは、偏在シナリオでは移動経路の近辺に監視スポットが存在し、測位間隔が短いためと考えられる。

監視スポットの半径を 100 m とした場合、偏在シナリオでは、監視スポットの半径が 1 km の場合と同様の結果であった (図 13)。このことから、監視スポットの半径が変化した場合でも、提案方式は、偏在シナリオのように移動経路上に存在する監視スポットの検出に有効であるといえる。なお、監視スポットの半径が小さくなることにより、実際に入圏が発生する確率が小さくなる。このため、監視スポットが発火抑止の状態とならず、測位回数が相対的に増加する結果となっている。

監視スポットの半径が 100 m の散在シナリオでは、各方式において再現率が 0.4 未満に低下する結果となった (図 14)。このシナリオでは、小さな半径の監視スポットが配置され、入圏の検出が困難な状態であるためと考えられる。各方式の性能を比較すると、想定最大速度利用方式

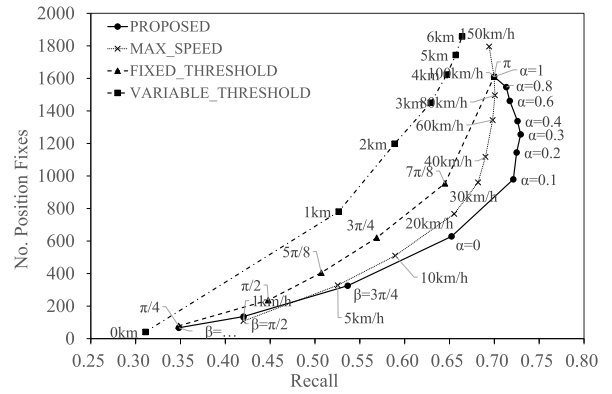


図 13 偏在シナリオにおける性能評価結果 (半径 100 m)

Fig. 13 Evaluation by clustering allocation (radius: 100 m).

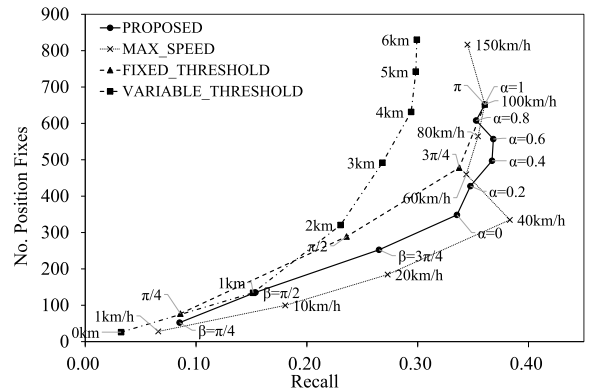


図 14 散在シナリオにおける性能評価結果 (半径 100 m)

Fig. 14 Evaluation by random allocation (radius: 100 m).

が性能面で有利となっている。

各シナリオの評価結果を比較すると、監視スポットの半径が同一の条件では、散在シナリオよりも偏在シナリオの再現率が高い。これは、偏在シナリオでは GPS 履歴のクラスタリングにより監視スポットを配置しており、長期間滞在する地点の近傍に監視スポットが配置されることから、入圏の検出までの時間的猶予が大きいためである。また、同一シナリオにおいて監視スポットの半径を変化させた場合で比較すると、半径が小さい 100 m の方が再現率が悪化している。これは、監視スポットの半径が小さくなることにより、検出漏れが増加しているためと考えられる。

6. おわりに

本論文では、接近速度を算出する機能を間隔可変測位方式に組み込むことにより、端末の進行方向に応じて測位間隔を削減する方式を提案した。提案方式では、監視スポットに対する接近角度の変化に対して測位間隔を連続的に変化させることにより、測位回数の増大を抑制しつつ検出漏れを改善する。GPS 履歴を利用した現実的な移動軌跡データによるシミュレーションにより 3 つの間隔可変測位方式と比較し、監視スポットが滞在点の近辺に存在するシナリオにおいて、検出精度を維持しつつ測位回数を 29% 削減す

る効果を確認した。今後は、間隔可変測位方式に加えて、移動検出機能や測位手段切替え機能を含めたシステム全体の最適化に取り組みたい。

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] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [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] 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).
- [10] Kjærsgaard, B.M., Langdal, J., Godsk, T. and Toftkjær, T.: EnTracked: Energy-Efficient Robust Position Tracking for Mobile Devices, *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys 2009)*, pp.221-234 (2009).
- [11] 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).
- [12] Pfoser, D. and Jensen, C.: Capturing the Uncertainty of Moving-Object Representations, *Proc. International Symposium Spatial Databases (SSD 1999)*, pp.111-131 (1999).
- [13] Rankin, J.: GPS and Differential GPS: An Error Model for Sensor Simulation, *Proc. IEEE Position Location and Navigation Symposium (PLANS'94)*, pp.260-266 (1994).



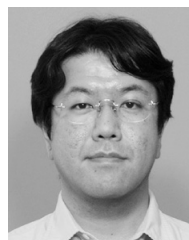
中川 智尋 (正会員)

株式会社 NTT ドコモ先進技術研究所勤務。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。アドホック・ネットワーク、端末セキュリティ、コンテンツ・ウェアコンピューティングの研究に従事。平成 20 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ティング、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。



稲村 浩 (正会員)

NTT ドコモ先進技術研究所勤務。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 6 年から 7 年にカーネギーメロン大学計算機科学科にて訪問研究員。平成 10 年より NTT ドコモ。平成 22 年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻後期博士課程単位取得退学。同大学博士 (工学)。モバイル環境におけるシステムソフトウェア、トランスポートプロトコル、ユーザインタフェースに関する研究開発に従事。電子情報通信学会、ACM、IEEE 各会員。



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。科学博士。平成 20~22 年日本學術振興会特別研究員。平成 22~24 年東京大学先端研特任助教。現在、同大学先端研助教。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、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 9~10 年コロンビア大学客員研究員。平成 14~18 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。ユビキタスネットワーク、センサネットワーク、ビッグデータ/M2M/モノのインターネット、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)、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、情報通信功績賞等受賞。新世代 M2M コンソーシアム会長、OECD/CDEP 副議長等。