

推薦論文

歩行時の磁気センシングデータを利用した屋内位置推定手法

村田 雄哉^{1,a)} 梶 克彦² 廣井 慧³ 河口 信夫³ 神山 剛⁵ 太田 賢⁴ 稲村 浩⁶

受付日 2016年3月30日, 採録日 2016年10月4日

概要: 本研究では, 事前のデータ収集コストを考慮にいた, 磁気センサのみを用いた屋内位置推定手法を提案する. 建物には鉄骨等に起因する残留磁気が存在し, この残留磁気には時間変化が少なく, 場所によって観測される値が異なるといった特徴がある. 提案手法では, 歩行しながら残留磁気を観測し, その変化系列を利用した位置推定を行う. 歩行しながら残留磁気を観測することで, 屋内測位に用いるデータ収集を容易にし, 低コストでの位置推定が可能になる. 建物内の経路を一定間隔でセルに分割し, 同一セル内で観測されたデータとしてまとめ, 磁気データモデルを作成する. この磁気データモデルには, 各セル内で観測された磁気データの平均値, 標準偏差や座標, セルの隣接関係といった情報が含まれる. 磁気データモデルと観測された磁気データの比較には, パーティクルフィルタを利用する. 観測される磁気変化を多数のパーティクルによって追従し, 位置推定を行う. 提案手法の評価実験を, HASC-IPSC に含まれる磁気データを用いて行った. 評価実験の結果, いくつかの条件が必要であるが, 提案手法による位置推定は可能であるといえる. また, 名古屋駅地下街で行った, Fingerprinting 方式による収集コストと比較して, 大幅な削減が確認できた.

キーワード: 位置推定, スマートフォン, 歩行者, 磁気, パーティクルフィルタ

Pedestrian Indoor Positioning Method Using Magnetic Data

YUYA MURATA^{1,a)} KATSUHIKO KAJI² KEI HIROI³ NOBUO KAWAGUCHI³ TAKESHI KAMIYAMA⁵
KEN OHTA⁴ HIROSHI INAMURA⁶

Received: March 30, 2016, Accepted: October 4, 2016

Abstract: In this research, we propose an indoor positioning method using magnetic data. Magnetic data observed in the building tends to be stable for years and has location dependency. Proposed method utilizes magnetic data observed by pedestrians, and estimates pedestrian position. Using pedestrian magnetic data makes data collection easier and reduces position estimation cost. To estimate position correctly, we create magnetic data model. Magnetic data model is created by dividing routes into small cells. Each cell has magnetic average, magnetic standard deviation, connection and coordinates. Using particle filter, we estimate pedestrian position by comparing observed data and each cell of magnetic data model. We evaluate this method with HASC-IPSC and the result of prior experiment. The result shows that proposed method estimates pedestrian position with error within 10m under a specific condition, and confirms that the data collection cost is reduced larger than conventional Fingerprinting method.

Keywords: Indoor positioning, smartphone, pedestrian, magnetic, particle filter

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya,
Aichi 464-8603, Japan
² 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technol-
ogy, Toyota, Aichi 470-0392, Japan
³ 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya Univer-
sity, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan
⁴ NTT ドコモ先進技術研究所
Research Laboratories, NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka,
Kanagawa 239-8536, Japan

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末を用いた, 様々な位置

⁵ NTT ドコモサービスイノベーション部
Department of Service Innovation, NTT DOCOMO, Inc.,
Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan
⁶ 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
a) murata@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

情報サービスが普及している。ナビゲーションやライフログ管理といったサービスが数多く提供されており、これらのサービスを利用するには、利用者の位置情報が必要となる。一般的に、位置情報の取得には GPS が利用される。しかし屋内では、衛星からの電波が建物等に遮断されるため、GPS による位置情報の取得は困難である。そのため、GPS に代わる屋内での位置情報取得方法が必要となる。

屋内で測位を行う研究には、RFID や無線 LAN 基地局を設置し利用する手法や、端末の加速度・角速度センサ等を用いる手法等、様々な手法が存在する。その中で代表的な手法は、複数の手法を統合した手法である [12], [13]。この手法では、統合する前のそれぞれの手法における弱点を互いに補い、高精度の位置推定を可能にしている。その一方、利用するセンサや機器が増えるため、端末の消費電力や機器の維持・管理コストが増加する。また、各手法には得意・不得意とする環境が存在するため、どのような環境にも適応可能な位置推定手法の実現は困難である。そのため、消費電力・コスト・環境といった、様々な要因に応じて適切に手法を切り替えられる必要がある。

本研究では、磁気センサのみを用いた位置推定手法を提案する。磁気センサは、GPS や角速度センサに比べ消費電流が少なく、単一のセンサで位置推定を行える可能性を持つ [7]。しかし、各手法に対し様々な検討が行われている中で、磁気センサのみを用いた測位手法に関する検討は、十分に行われていない。そこで、本研究では磁気センサに着目し、磁気センサのみを用いた位置推定を行う。

建物には鉄骨等に起因する残留磁気が存在し、この残留磁気には時間変化が少なく、場所によって観測される値が異なるといった特徴がある [1]。提案手法では、歩行しながら残留磁気を観測し、その変化系列を利用した位置推定を行う。歩行しながら残留磁気を観測することで、屋内測位に用いるデータ収集を容易にし、低コストでの位置推定が可能になる。本研究では、事前データ収集コストも考慮に入れた、残留磁気を利用した位置推定手法を提案し、その精度を検証する。

以下に本稿の構成を述べる。まず 2 章で屋内位置推定の関連研究について述べる。3 章では、磁気センサを利用した位置推定手法について述べる。4 章では、提案手法を用いて行った評価実験とその結果に対する考察を行う。5 章で本稿のまとめと、今後の課題について述べる。

2. 関連研究

建物内で位置推定を行う研究には、位置推定を行う環境内に機器を設置し利用する手法や、環境内に機器を追加せずに、携帯端末の加速度・角速度等のセンサを利用する手法が存在する。

位置推定を行う環境内に機器を設置し利用する手法は、絶対測位手法と呼ばれる。Bluetooth や RFID タグ、マイ

ク、スピーカ等を環境内に設置し、機器から得られる情報をもとに利用者の位置を推定する [2], [3], [4] また、既存の無線 LAN 基地局や照明、建物の残留磁気を利用し、機器利用に関するコストを軽減し、位置推定を行う手法も提案されている [5], [6], [9]。これらの手法では、利用する機器の導入・維持・管理コストに加え、事前に必要なデータ収集コストが課題となる。データ収集には、多くの場合 Fingerprinting 方式が用いられる。Fingerprinting 方式では、各地点で正確なデータ収集が可能であるが、収集にかかるコストが大きい。ショッピングモールや複数フロアを持つ建物で Fingerprinting 方式によるデータ収集を行った場合、計測時間や人的コストは膨大になる。また、データ収集は店舗の入れ替えや設備の配置換え等、環境の情報が変わるたびに行わなければならないため、更新のコストも高くなる。

スマートフォン等の携帯端末には、加速度・角速度といったセンサが搭載されている。これらのセンサを利用し、前回の位置からの変位により位置を推定する。このような手法は、相対測位手法と呼ばれる。特に、歩行者を対象とした手法は、Pedestrian Dead Reckoning (以下 PDR) と呼ばれる [10], [11]。PDR では、ユーザの歩数、歩幅、進行方向を推定し、前回の位置からの変位を算出し、ユーザの位置を推定する。PDR による位置推定手法は、変位によって相対的に位置を推定するため、長距離や長時間の推定では誤差の累積が課題となる。また、多くの PDR では、複数のセンサを同時に利用するため、端末の消費電力も問題としてあげられる。

絶対測位手法と相対測位手法を組み合わせた、統合手法も存在する。組合せにより双方の手法の弱点を補いあい、測位精度を向上させている [12], [14], [15]。その一方、利用するセンサや機器が増えるため、端末の消費電力や機器の維持・管理コストが増加する。また、組み合わせ前の各手法には得意・不得意とする環境が存在する。対象とする環境に対応するためには、様々な要因に応じて適切に位置推定手法を切り替えられる必要がある。

一方、磁気センサのみを利用した位置推定手法としていくつかの取り組みが行われている。Subbu [16] は、建物内の構造物の磁気に着目し、屋内における位置推定を行っている。また、Kim ら [17] は地磁気の異常を利用した位置推定手法を提案した。これらの研究はいずれも屋内の地磁気の特異性に注目し、位置推定を行う手法である。磁気センサを利用する利点は、GPS や角速度センサに比べ消費電流が少なく、単一のセンサで位置推定を行える可能性を持つため、位置推定の低コスト化に貢献できる点である。その

本論文の内容は 2015 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウムにて報告され、ユビキタスコンピューティングシステム研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

ため、磁気センサのみを用いた測位精度の向上により、コスト削減や手法を組み合わせることで測位環境への対応の幅を広げられる。また、実環境において屋内測位を運用していくためには、導入・維持・管理・更新のコストが低いことが求められる。しかし、事前のデータ収集やデータの更新といったコストは、考慮されない場合が多い。それらのコストは、実環境での利用を想定した場合重要なものであるため、事前データ収集や更新のコストといった、運用上の点も考慮する必要がある。以上をふまえると、実用性を見すえた磁気センサのみを利用した位置推定には、コストを考慮に入れた位置推定手法が必要である。そこで、本研究では磁気センサのみを利用した位置推定の精度評価を行うとともに、データ収集を簡易化し運用上のコストを削減する手法として、歩行時の磁気センシングデータを利用した屋内位置推定手法を提案する。

3. 残留磁気を利用した位置推定手法

本研究では建物の残留磁気に着目し、磁気センサのみを用いた屋内位置推定手法を提案する。残留磁気には時間変化が少なく、観測される値は場所によって異なるといった特徴がある。提案手法では、この残留磁気の特徴を位置推定に利用する。提案手法の全体像を図1に示す。センサノイズの影響を軽減し、正確に位置推定を行うために、位置推定環境の磁気データモデルを作成する。磁気データモデルの作成には、複数の歩行者によって収集された磁気データを利用する。建物内の経路を一定間隔でセルに分割し、同一セル内で観測されたデータをまとめ、磁気データモデルを作成する。磁気データモデルと観測された磁気データの比較には、パーティクルフィルタを利用する。

建物内において、観測される磁気値は、場所によって異なるが、類似した値を持つ箇所も少なからず存在する。しかし、移動しながら磁気を観測した場合、その変化系列には特徴が表れる。異なる経路を移動した場合と同一経路を移動した場合の、垂直方向の磁気データを図2に示す。同一経路を移動した場合は、全体的に磁気変化が類似している。一方、異なる経路を移動した場合は、部分的に類似した値を持つ瞬間もあるが、全体的な磁気変化は異なっている。そのため、経路ごとに観測される磁気の変化系列は区別可能であると考えられる。この経路ごとに異なる磁気の変化系列を多数のパーティクルによって追従し、位置推定を行う。

3.1 歩行によるデータ収集

提案手法で利用する磁気データは、建物内の経路を移動しながら収集する。歩行しながら磁気データを観測することで、事前データ収集を容易に行える。また、機材を設置する、不自然に立ち止まる等といった動作を必要としないため、地下街やショッピングモール等の商業施設において

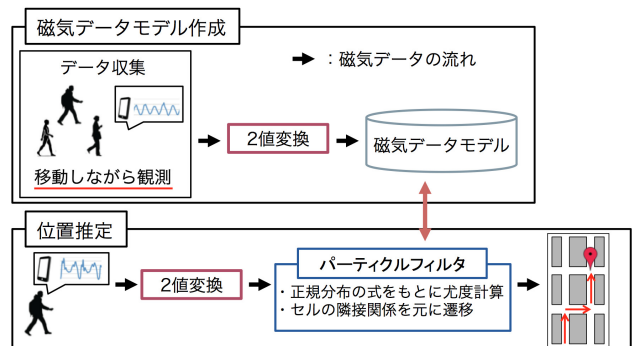
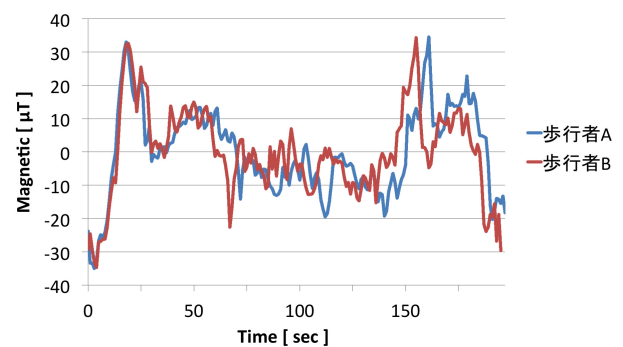
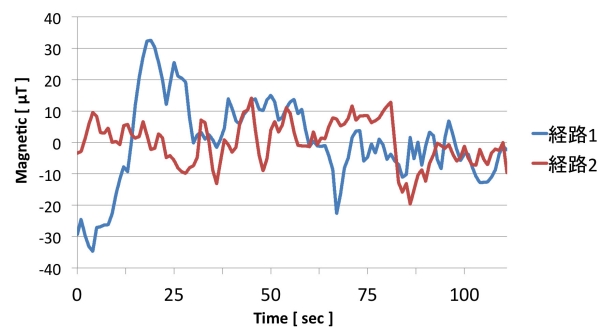


図1 提案手法の全体像

Fig. 1 Overview of proposed method.



(a) 同一経路を移動した場合



(b) 異なる経路を移動した場合

図2 経路移動時に観測される磁気データ (垂直方向)

Fig. 2 Route magnetic data (Vertical direction).

も、周囲の妨げにならない。

本研究は、普段の人の移動時に観測される磁気を利用したデータ収集とそれに基づく屋内位置推定の実現を最終目的とする。しかし、観測される磁気値は、観測場所や端末の姿勢の影響を大きく受ける。そのため本稿では便宜的に経路を定め、端末の位置を歩行者の腰に固定した状態でデータ収集を行い、歩行によるデータ収集の有効性を検証する。また、本研究では複数の歩行者や端末によるデータ収集を想定するため、計測時の歩行速度・端末の機種に関して制約を設けていない。端末の位置を歩行者の腰に固定した状態でデータ収集を行う。計測時の歩行速度・端末の

機種に関しては、制約を設けていない。

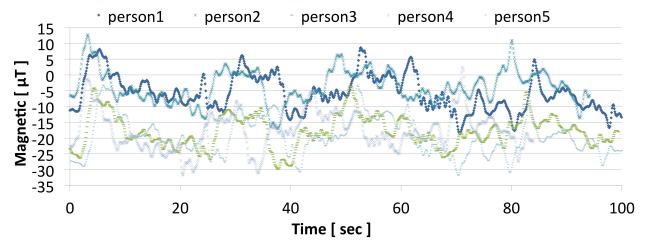
データ収集の際の移動経路の設定には、歩行空間ネットワーク構造を作成して行う。歩行空間ネットワーク構造とは、人がその建物内をどのように移動可能であるかをノードリンク構造で記述したものである。ノードは、経路の開始・終了地点や階段の踊り場、曲がり角を表し、リンクは移動可能なノード間のつながりを表す。各ノードには、ノード ID、3次元座標、他のノードとのリンク情報が与えられている。位置推定環境において、地図情報から各点にノードを設置し、各ノードとそのリンク情報をもとに歩行空間ネットワーク構造を作成する。データ収集時には、歩行空間ネットワーク構造から、あらかじめどの経路を歩くかを決めておく。任意の開始ノード・終了ノードを選択し、データを収集する経路を設定する。端末を体の一部に装着し、開始ノードから終了ノードまで一定速度で移動し、データを収集する。このとき、通過するノードごとに音声やボタン操作等で通過時間を記録する。記録された通過時間をもとに、実際の位置と観測されたデータのひも付けを行う。位置推定環境全体を網羅するように経路を設定し、上記の方法でデータ収集を行う。

関連研究では、データ収集に Fingerprinting 方式を利用している。通常の Fingerprint 方式では、対象とする環境の広さに依存して、計測時間や人的コストが増加する。そのため、ショッピングモールや複数フロアを持つ建物でデータ収集を行った場合、そのコストは膨大になる。歩行空間ネットワーク構造を利用したデータ収集では、1 経路あたりの計測時間は移動時間と同等と短く、複数の経路を計測した場合でも短時間でデータ収集が可能である。また、歩行空間ネットワーク構造の作成は、位置推定環境のマップがあれば容易に作成可能であり、建物構造が変わらない限り更新する必要はない。そのため、従来手法で利用されている Fingerprinting 方式に比べ、データ収集にかかるコストが少なく、更新が容易であるといえる。

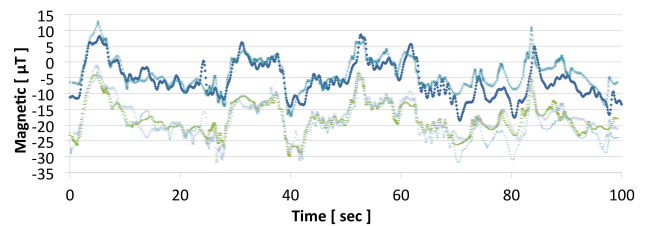
図 3(a) に観測された磁気データを示す。このデータ収集では、5 名に対し、Nexus4 を配布しデータを収集している。この図から、同じ機種を使用してデータを収集した場合であっても、観測された磁気データの絶対値が異なることが確認できた。異なる端末でデータ収集を行った場合においても同様の傾向を確認している。

3.2 磁気データモデルの作成

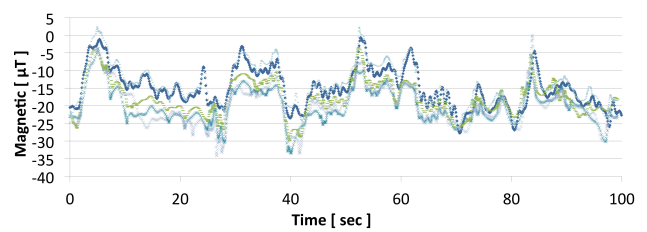
建物内の経路を移動中に観測される磁気データを用い、磁気データモデルを作成する。磁気データモデル作成の際、移動経路を一定間隔でセルに分割する。セル分割により、特徴的な磁気変化をしている区間を切り出し、セルごとに異なった値を持たせられる。セルのサイズは、大きすぎると特徴的な磁気変化をとらえきれなくなり、小さすぎると類似の値を持つセルの数が膨大になってしまう。その



(a) 観測された磁気データ



(b) DP マッチング 適用後



(c) DP マッチング + RMS 適用後

図 3 DP マッチングと最小二乗誤差 (RMS) を利用した観測データの調整

Fig. 3 Data fitting with DP matching and root mean square.

ため、本稿ではセルのサイズを経験的に 1 m としている。各セルには、セルの ID、セル内で観測された磁気の平均値、標準偏差や座標、隣接関係といった情報を与えている。複数の歩行者によって観測された磁気データを利用し、位置推定環境の磁気データモデルを作成する。

3.2.1 磁気データの変換

端末に搭載される磁気センサは、端末を基準とした座標系で値を観測する。この座標系は、実環境における座標系とは異なるため、観測した値を利用するには座標系を変換する必要がある。座標系の変換には、東西南北といった方位を利用できるが、残留磁気の影響により建物内での方位の取得は困難である。そのため提案手法では、観測に利用する端末の姿勢は固定されていると想定し、磁気データの X・Z 軸成分を合成した水平成分、Y 軸成分を垂直成分に変換し利用する。垂直・水平の 2 成分への変換により、Y 軸まわりの自由度を減らし、方位の取得なしに磁気データを利用できる。

3.2.2 時間方向の調整

磁気データモデルの作成に利用する磁気データは、歩行者によって観測される。そのため、同一経路を移動した場合であっても、歩行者の移動速度によって計測時間が異なる。磁気データモデルを作成する際、実際の位置と観測した磁気データのひも付けには、計測時間を利用している。計測時間のズレは磁気データモデルの精度に影響するため、同一経路を移動した際の計測時間を合わせる必要がある。

計測時間の調整には、DP マッチングを利用する [8]。DP マッチングは弾性マッチングの一種で、入力パターンと参照パターンのデータ系列の類似度を計算する方法の 1 つである。それぞれのパターンをデータ系の列順に比較し、パターンの類似度を算出する。提案手法では DP マッチングを利用し、観測された磁気データの類似度をもとに時間調整を行う。観測される値を基準とすることで、より正確に歩行者ごとに見られる計測時間の違いを吸収できると考えられる。

データ間の類似度の計算には、式 (1)、式 (2) を用いる。入力信号をそれぞれ m 、 n とし、観測された値を時系列順に比較する。格子点 (i, j) に至る累積最小距離 $D(i, j)$ を、ベクトル間の距離 $d(i, j)$ と格子点 (i, j) をもとに算出し、この値をもとに時間調整を行う。ベクトル間の距離の計算には、各成分の差の絶対値を利用する。

$$D(i, j) = \min \begin{cases} D(i-1, j-2) + 2d(i, j-1) + d(i, j) \\ D(i-1, j-1) + d(i, j) \\ D(i-2, j-1) + 2d(i-1, j) + d(i, j) \end{cases} \quad (1)$$

$$d(i, j) = |m_i - n_j| \quad (2)$$

同一経路を移動した複数のデータから基準とするものを 1 つ選び、残りのデータの計測時間を基準のデータに合わせる。算出された類似度に基づき、対応する磁気データの観測時間を調整する。DP マッチングを利用し、計測時間の調整を行った結果を図 3(b) に示す。DP マッチング適用前では、極大値・極小値の計測時間に歩行者ごとの差が見られる。これに対し DP マッチング適用後では、歩行者ごとに見られた極大値・極小値の計測時間の差が軽減されている。提案手法では、各移動経路で収集されたデータに対して DP マッチングを適用し、経路ごとに計測時間の調整を行った。

3.2.3 大きさ方向の調整

観測される磁気データは、端末や歩行者に起因するノイズが含まれているため、同じ経路を移動した場合であっても観測値に差が生じる可能性がある。提案手法では、観測される磁気値をもとに位置を推定するため、観測値の差は位置推定精度に影響を与える。そのため磁気データモデル作成の際には、この違いを調整する必要がある。

大きさ方向の調整には、二乗平均平方根 (以下 RMS) を利用する。まず、調整の際に基準とするデータを選定する。同一経路を移動した複数のデータの中からデータを 1 つ選択する。選択したデータとその他のデータの RMS をそれぞれ計算し、その総和を算出する。同一経路の中で、RMS の総和が最も小さくなったものを基準とするデータとする。次に、基準とするデータをもとに、その他のデータの値を調整する。基準とするデータと、同一経路に含まれるその他のデータをそれぞれ m 、 n 、入力信号の長さを N 、計測時刻を t ($1 \leq t \leq T$) とし、式 (3) をもとに、それぞれのデータとの RMS を算出する。RMS を算出した後、式 (4) をもとに、基準とするデータの値に近くなるように、各時刻の値に RMS を加減算し、調整後のデータ n'_t を計算する。この操作を繰り返し、基準となるデータとの RMS が最小になるように、大きさ方向の調整を行う。

RMS による大きさ方向の調整を行った結果を、図 3(c) に示す。入力する磁気データは、すべて DP マッチングによる時間調整を行ったものを利用した。大きさ方向の調整前のデータは、全体的な磁気変化は類似しているが、歩行者によって同時刻に観測される値に差が見られる。大きさ方向の調整を行ったデータでは、その差が軽減されている。提案手法では、各移動経路で収集されたデータに対し、経路ごとに大きさ方向の調整を行った。

$$rms = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (m_t - n_t) \quad (3)$$

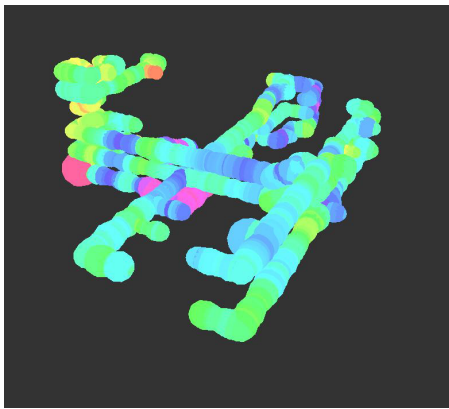
$$n'_t = n_t - rms \quad (4)$$

作成した磁気データモデルを図 4 に示す。色が磁気の大さき、半径が観測された磁気標準偏差を表している。また、図 5(a)、図 5(b) に各セルが持つ磁気データの値とその標準偏差を示す。図 5(a) より、類似した値を持つセルも複数存在するが、セルごとに値が異なっていることが確認できる。また図 5(b) より、標準偏差が大きく、情報があまり信用できないセルも存在すると確認できる。この磁気データモデルを利用し、位置推定を行うためには、観測される磁気データの曖昧さも考慮しなければならない。

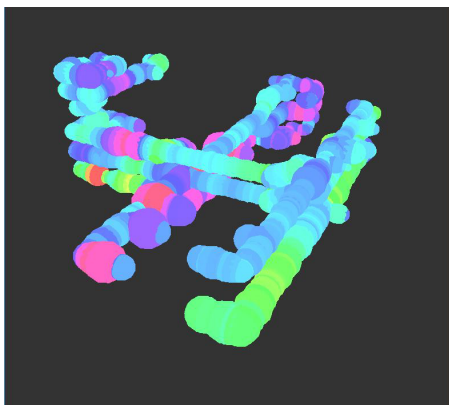
3.3 パーティクルフィルタによる位置推定

提案手法では、パーティクルフィルタを採用している。作成した磁気データモデルには、特徴的な値を持つセルだけでなく、標準偏差が大きく、観測される値にばらつきのあるセルも存在する。そのため、多数のパーティクルによってばらつきの大きい磁気変化を追従する。

本研究は、初期位置なしでの位置推定を最終目的とする。しかし、磁気データモデルには類似した値や磁気変化をする箇所も存在するため、瞬間的に観測した磁気値やその変化だけでの位置推定は困難であった。そのため、提案手法では便宜的に初期位置を導入した。初期位置は、Wi-Fi



(a) 水平方向成分の磁気データモデル



(b) 垂直方向成分の磁気データモデル

図 4 磁気データモデル

Fig. 4 Magnetic data model.

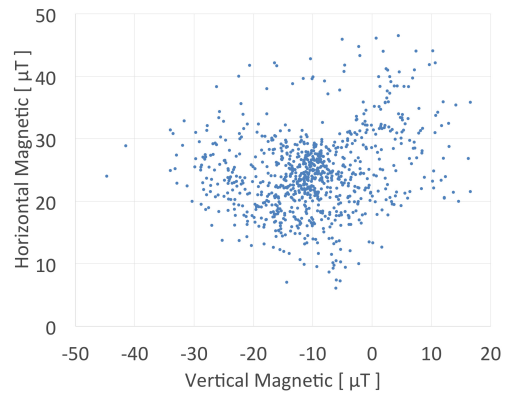
やその他のセンサを利用する手法との組合せにより取得できる可能性を持つ。提案手法では初期位置からの変位をパーティクルによって追従し、その変位に基づいた位置推定を行う。

位置推定を行う際、観測された磁気データにはスライド窓を適用する。窓内の磁気データの平均値をとり、入力値として利用する。提案手法では、窓幅を 1.0s、窓のスライド幅を 0.5s とした。

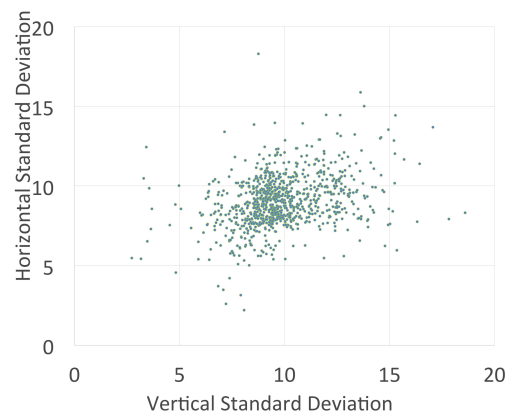
以降、観測された磁気データを時系列順に入力し、各パーティクルが存在するセルの情報と比較する。各パーティクルは、自身の尤度を計算し、尤度の高い箇所にパーティクルが集まるように自身の位置を更新する。パーティクルフィルタは、予測・尤度計算・リサンプリングの 3 つの処理を 1 ステップとして繰り返し、位置推定をすすめる。以下に、各処理の詳細を述べる。

3.3.1 予測

各パーティクルの位置を更新する。パーティクルは、磁気データモデルのいずれかのセルに存在している。各セルの持つ隣接関係の情報をもとに、パーティクルを遷移させる。セルの隣接関係には、現在パーティクルが存在する



(a) 磁気の平均値



(b) 磁気の標準偏差

図 5 磁気データモデルの各セルのデータ

Fig. 5 Cell data of magnetic data model.

セルと、そのセルが隣り合うセルが含まれる。また、パーティクルには直前の位置からの移動方向を持たせている。パーティクルの移動方向とセルの隣接関係を利用し、パーティクルの位置を更新する。

3.3.2 尤度計算

観測した磁気データと各パーティクルの存在するセルの情報を利用して尤度を計算する。本項における尤度の意味とは、パーティクルが存在するセルにおいて、観測された磁気データの値が得られる確率を表す。パーティクルの尤度 L は、水平方向の磁気データに対する尤度 L_v と垂直方向の磁気データに対する尤度 L_h の積で求める。

$$L = L_v \times L_h \quad (5)$$

尤度の計算には一般的な正規分布の式を用いる。平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布 $N(x | \mu, \sigma)$ は次の式で表現される。

$$N(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

尤度計算に利用する平均値、標準偏差には、磁気データモデルの各セルの持つ値を利用した。すべてのパーティクルの尤度を求めた後、尤度の総和が1になるように正規化を行う。

3.3.3 リサンプリング

各パーティクルの尤度に基づいて、リサンプリングを行う。パーティクルの選定には、ルーレット選択を用いる。ルーレット選択とは、適応度に比例する確率で次世代に残す個体を選ぶ選択法である。そのため、高い尤度を持つパーティクルだけでなく、低い尤度を持つパーティクルも確率的に選択される。これは、パーティクルの局所解への収束を防ぐためである。ルーレット選択により、次世代に残すパーティクルを選択し、選択されなかったパーティクルを削除する。削除し減少したパーティクルの数だけ、選択したパーティクルを複製する。

3.3.4 パーティクル分布のクラスタリングに基づく位置推定

リサンプリング後のパーティクルの分布から、位置推定を行う。パーティクルは様々な場所に散らばって存在しているため、まずクラスタリングを行う。クラスタリングの手法には、x-means法を利用した。x-means法とは、k-means法の拡張であり、事前にクラスタ数を指定する必要がない。パーティクルがいくつのクラスタに分割されるかが未知であるため、提案手法ではx-means法を採用し、アルゴリズムは石岡の研究 [18] を用いた。x-means法によるクラスタリング後、最も大きなクラスタの重心を推定位置とする。

パーティクルフィルタによる位置推定の様子を、図6に示す。赤い点が正解位置、青い点が推定位置、水色がパーティクルを表している。パーティクルは、磁気データモデルのいずれかのセルに存在している(図6:1)。提案手法では初期位置を与えているため、初期位置のセルにパーティクルを配置する。まず予測ステップで、セルの持つ隣接関係リストをもとに自身の位置を更新する(図6:2)。続いて、尤度計算ステップで観測値と自身の存在するセルの尤度を計算し、リサンプリングのステップで位置推定に利用するパーティクルを選択する。リサンプリング後のパーティクルをx-means法によってクラスタリングし、最も大きなクラスタの重心をもとに位置を推定する(図6:3)。観測された磁気データが入力されるたびに前述のステップを繰り返し、位置推定を行う(図6:4)。

推定の途中、分岐により一部パーティクルが間違っただけに進む場合がある(図6:5)が、x-means法を利用しクラスタリングすることで、提案手法ではその影響を小さくしている。

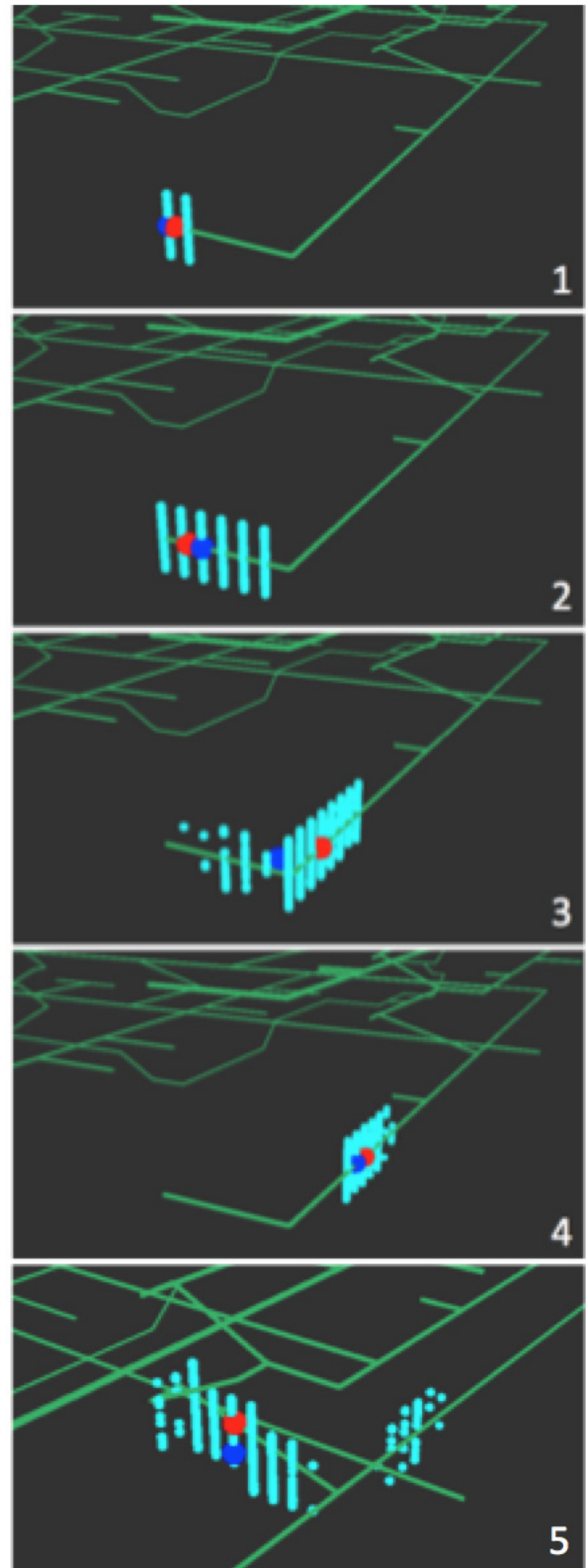


図6 パーティクルフィルタによる位置推定の様子
Fig. 6 Indoor positioning with particle filter.

4. 評価実験

4.1 実験内容

本位置推定手法による推定精度とデータ収集にかかるコ

表 1 利用した経路データ
Table 1 Experiment data.

被験者数	44 名
経路数	11 経路
1 経路あたりの平均歩行者数	4 名
端末	Nexus4 (Android 4.1.1)
端末位置	腰後方中央

表 2 名古屋駅地下街におけるデータ収集エリア
Table 2 Data collection area in Nagoya underground mall.

エリア	大きさ	経路数	面積 [m ²]
通路	5 m × 125 m	2	1,250
	5 m × 32 m	2	320
	6 m × 220 m	2	2,640
	6 m × 10 m	4	240
階段	5 m × 5 m	3	75
	6 m × 7 m	7	274
	6 m × 3 m	7	126
駅側スペース	2,390		
合計	7,335		

ストを検証するため、評価実験を行った。位置推定精度の評価実験には、HASC-IPSC を利用した [19]。このデータのうち、特定の 1 つの建物内を移動した 44 名のデータを評価実験に利用した。利用したデータの詳細を表 1 に示す。経路を移動中、歩行者は止まることなく、一定速度で移動している。これらのデータを利用し、磁気データモデル作成を行った。また、位置推定に利用するデータは、磁気データモデル作成時と同じものを利用している。

データ収集コストの評価には、実際に名古屋駅地下街で行った、Fingerprinting 方式による収集時のデータを利用した。地下街エリアの詳細を表 2 に示す。同じエリアにおいて、それぞれの方法でデータ収集を行った場合の収集効率を算出し、その値をもとに双方のコストを比較した。

4.2 実験結果

提案手法を用いて位置推定を行った結果を、図 7 に示す。図 7 は、提案手法を用いて行った、位置推定精度の分布を表す。位置推定精度の詳細を、表 3、表 4 に示す。表 3 は経路ごとの推定精度を、表 4 は同一経路を移動した歩行者の位置推定精度を表す。誤差の値は、各時刻における推定位置と正解位置の誤差を算出し、その平均値をとったものである。パーティクルフィルタは試行ごとに結果が異なるため、1 つのデータに対して 5 回試行を繰り返す。5 回の平均値をそのデータの誤差とした実験の結果、1 秒ごとの位置推定精度は全被験者の平均で 13.7 m、最小で 4.7 m、最大で 24.0 m であった。

それぞれの手法における収集効率を、表 2 をもとに算出した。本実験では約 1 m 間隔で観測地点を設定し、各地点で 30 秒間端末を観測台に固定してデータ収集を行った。観

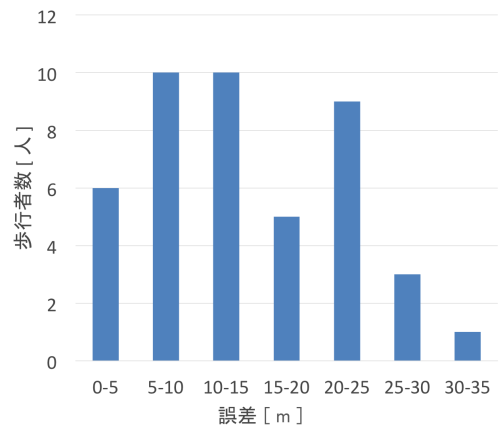


図 7 誤差分布

Fig. 7 Error distribution.

表 3 経路ごとの位置推定結果

Table 3 Estimation result of each route.

経路名	経路長 [m]	平均誤差 [m]
ra01	77.2	4.7
ra02	59.9	8.4
ra03	96.2	19.0
ra04	77.4	21.5
ra05	34.4	6.9
ra06	67.5	24.0
ra07	58.5	16.4
ra08	73.3	9.7
ra09	95.2	11.5
ra10	74.0	7.7
ra11	80.1	20.9
全体の平均		13.7
最小の経路平均誤差		4.7

表 4 同一経路 (ra07) を移動した歩行者の位置推定結果

Table 4 Estimation result of pedestrians in same route.

歩行者	平均誤差 [m]
Person1239	31.5
Person1249	25.9
Person1255	8.7
Person1299	5.7
Person1300	9.3
Person1304	14.0
Person1306	19.4

測地点は位置推定環境全体を網羅するように設定し、その位置情報は地図をもとに実際の位置と対応付けた。人通りの少ない時間帯を狙って Fingerprinting 方式によるデータ収集を行い、約 7,300 m² のエリアに対し、計測時間は 2 名で約 14 時間であった。よって、1 名あたり約 260 m²/h でペースでデータ収集を行ったことになる。歩行によるデータ収集では、成人の平均歩行速度を 1.2 m/s とし、幅 1 m 間隔で収集したとして、収集効率を算出する。このとき、Fingerprinting 方式と同様に、位置推定環境全体を網羅す

るように経路を歩行したとする。これらの条件から、歩行によるデータ収集では、複数の歩行者が同じ経路のデータを観測する必要があるが、1名あたり約4,200m²/hで行えることになる。

4.3 考察

位置推定精度

評価実験の結果、利用する歩行者のデータによって推定精度に大きく差が見られた。全体の約35%の歩行者が、平均誤差10m以下で推定可能であったのに対し、約30%の歩行者で20mを超える誤差が確認された。これらの推定精度の差は、経路や観測値に含まれるノイズに起因するものと考えられる。

表3の結果から、誤差が小さい経路では、複数のセンサを用いた既存手法に近い精度で位置推定が可能であった。しかし、20mを超える誤差が確認された経路も多数存在する。これらの経路では、磁気値や変化に特徴的な箇所があまり見られなかった。そのため、パーティクルが歩行者の移動を追従できず、位置推定が行えなかったと考えられる。また提案手法では、初期位置を与えているが、表3より、経路長によらず誤差の値にばらつきが見られ、誤差は経路長には影響されていないことが分かる。

また、同一経路においても、歩行者によって推定精度に差が見られた。同一経路を移動した5名の歩行者の推定結果を表4に示す。誤差が小さい歩行者のデータでは、歩行者の移動にともない、パーティクルが遷移し高い精度で位置推定が行っていた。これに対し誤差が大きい歩行者のデータでは、パーティクルが正解位置と反対方向に進んでいる状態や一部にとどまっている状態が確認された。これは、観測時のノイズや端末の個体差の影響が考えられる。磁気データモデル作成時には、センサ自体の磁化等に起因するノイズを考慮しているが、位置推定時には十分に考慮できていない。そのため、観測した磁気データにノイズが加わり、正解位置のセルに存在するパーティクルよりも異なるセルに存在するパーティクルの尤度が高くなった可能性がある。その結果、歩行者の位置を推定できなくなったと考えられる。我々は平均6~12mの精度であれば、屋内ナビゲーションに利用可能な精度と考えており、本手法は、場所によっては精度が不十分な場合もあるが、なんとか実用可能な範囲といえる。上記のように、磁気の変化がない場合や、センサの磁化等によっては、磁気データモデルのセル上をパーティクルが適切に遷移しない場合があるが、実験で用いた半数以上の経路(6経路)において平均12m未満の位置推定精度が確認されている。すなわち、歩行時の磁気センシングデータでも、磁気データの位置や大きさを調整したうえで、セル分割して磁気特徴を記録し、その上をパーティクルフィルタで効率良く探索することにより、実用可能な範囲での位置推定精度が確保できている

といえる。

データ収集コスト

データ収集コストを比較した結果、歩行によるデータ収集の効率性は、Fingerprinting方式の約16倍となった。また、歩行によるデータ収集には、端末以外に特別な機材を用いない。そのため、観測者に負担をかけず、他の歩行者の通行を妨げることもない。以上の点から、Fingerprinting方式に比べ、歩行によるデータ収集にかかるコストは低いといえる。しかし、各観測地点における観測値の精度は、Fingerprinting方式より低くなると考えられる。その理由として、歩行によるデータ収集では、観測地点と観測値のひも付けに歩行速度を利用している。連続的に観測するため高い密度で観測できるが、歩行者ごとの歩行速度の違いが影響し、Fingerprinting方式に比べ精度は低下すると考えられる。

これら評価実験の結果から、特徴的な磁気変化を含む、センサノイズの影響が少ないといった条件が必要であるが、提案手法による位置推定は十分可能であるといえる。しかし、条件にあてはまらない経路や歩行者のデータもまだまだ多く存在する。そのため、うまく推定が行えない経路への対応や磁気センサへのノイズの対応等、解決すべき課題は多い。センサノイズに関しては、ノイズの影響を軽減する仕組みを追加する、センシング前にキャリブレーションを行うといった操作を加えることにより、精度を改善できると考えられる。

5. おわりに

本稿では、事前のデータ収集コストを考慮にいたした、磁気センサのみを用いた屋内位置推定手法を提案した。提案手法では、歩行中に観測される残留磁気を利用した。歩行しながら残留磁気を観測することで、屋内測位に用いるデータ収集を容易にし、低コストでの位置推定が可能になる。建物内の経路を一定間隔でセルに分割し、同一セル内で観測されたデータとまとめ、磁気データモデルを作成した。磁気データモデルの作成に利用する磁気データには、端末や歩行者に起因するノイズが含まれるため、DPマッチング、二乗平均平方根を利用し、データの調整を行った。作成した磁気データモデルには、各セル内で観測された磁気値の平均値、標準偏差や座標、セルの隣接関係といった情報が含まれる。磁気データモデルと観測された磁気データの比較には、パーティクルフィルタを利用した。観測される磁気変化を多数のパーティクルによって追従し、位置推定を行った。

提案手法の評価実験を、HASC-IPSCに含まれる磁気データを用いて行った。評価実験の結果、いくつかの条件が必要であるが、提案手法による位置推定は可能であるといえる。また、名古屋駅地下街で行った、Fingerprinting方式による収集コストと比較して、大幅な削減が確認できた。

今後の課題として、以下の点があげられる。

- 初期位置の推定
評価実験では、位置推定前に初期位置を与えている。しかし実環境での利用を想定すると、初期位置は推定によって与えられることが望ましい。そのため、初期位置の推定を組み込む必要があると考えられる。パーティクルフィルタによって初期位置の推定を行うためには、より推定精度を向上させる必要がある。
- 端末姿勢の推定
本稿では、端末は歩行者の腰の後方中心に固定されていると想定している。しかし端末を利用する際、歩行者は様々な位置に端末を保持している。端末を保持する場所によって端末の姿勢は異なるため、観測されるセンサデータも異なる。そのため、端末の保持位置とその際の姿勢を考慮し、姿勢によって磁気データモデルや観測した磁気データの変換を行わなければならない。
- 類似した磁気を帯びた場所への対応
提案手法では、残留磁気の値に着目している。位置推定を行う環境が広くなれば、それだけ類似する磁気を持つ場所が増える可能性がある。類似する磁気を持つ場所が増えれば、それだけ推定を誤る可能性も増加する。そのため、より特徴的な磁気を持つ場所で補正をかける、微分値といった特徴量を利用する等、類似する磁気を持つ場所への対応を考慮しなければならない。

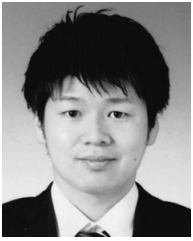
参考文献

- [1] 新納敏文, 加川幸雄: 鉄骨構造物における残留磁気の実態とその発生過程の検証, 日本建築学会計画系論文誌, No.539, pp.97-102 (2001).
- [2] 田岡康裕, 納谷太, 野間春生, 小暮潔, 李周浩: Bluetoothの電波強度を用いたユーザの位置推定手法, 情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol.108, No.138, pp.147-152 (2008).
- [3] 小川智明, 吉野修一, 清水雅史: 屋内における無線タグを用いた学習型位置推定法, 情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol.2004, No.66, pp.31-38 (2004).
- [4] 佐藤智美, 小宮山哲, 下田雅彦, 劉渤江, 横田一正: Bluetoothの電波強度を用いた位置推定方式の検討, DEIM Forum (2011).
- [5] 藤田迪, 梶克彦, 河口信夫: Gaussian Mixture Modelを用いた無線LAN位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.1069-1081 (2011).
- [6] IndoorAtlas, Ambient magnetic field-based indoor location technology: Bringing the compass to the next level, IndoorAtlas Ltd (2012).
- [7] 長堀哲, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃: 端末間の機能分散による消費電力平滑化手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, モバイルマルチメディア通信, Vol.112, No.493, pp.317-321 (2013).
- [8] 内田誠一: DPマッチング概説: 基本と様々な拡張, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解, Vol.106, No.428, pp.31-36 (2006).
- [9] ラホックサムアン, 尾崎功一: 磁気マップに基づいた屋内車輪型移動ロボットの自己位置認識 (移動ロボットの自己位置推定と地図構築), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2008, pp.2P2-C08(1)-2P2-C08(2) (2008).
- [10] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之: 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.2, pp.558-570 (2011).
- [11] 五百歳重典, 鈴木孝幸, 田中博: スマートフォン内蔵センサーを用いた複数フロアデッドレコニング, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, Vol.2013, pp.723-735 (2013).
- [12] Ban, R., Kaji, K., Hiroi, K. and Kawaguchi, N.: Indoor Positioning Method Integrating Pedestrian Dead Reckoning with Magnetic Field and WiFi Fingerprints, *Proc. 2015 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp.167-172 (2015).
- [13] Hilsenbeck, S., Bobkov, D., Schroth, G., Huitl, R. and Steinbach, E.: Graph-based Data Fusion of Pedometer and WiFi Measurements for Mobile Indoor Positioning, *Proc. 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.147-158 (2014).
- [14] Xu, Q., Zheng, R. and Hranilovic, S.: IDy LL: Indoor Localization Using Inertial and Light Sensors on Smartphones, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.307-318 (2015).
- [15] Xie, H., Gu, T., Tao X., Ye, H. and Lv, J.: MaLoc: A Practical Magnetic Fingerprinting Approach to Indoor Localization Using Smartphones, *Proc. 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.243-253 (2014).
- [16] Kalyan Pathapati Subbu, P.K., Gozick, B. and Dantu, R.: LocateMe: Magnetic-fields-based indoor localization using smartphones, *ACM Trans. Intelligent Systems and Technology (TIST)*, Vol.4, No.4, pp.73:1-73:27 (2013).
- [17] Kim, S., Kim, Y., Yoon, J. and Kim, S.E.: Indoor positioning system using geomagnetic anomalies for smartphones, *Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2012)*, pp.1-5 (2012).
- [18] 石岡恒憲: クラスタ数を自動決定する k-means アルゴリズムの拡張について, 応用統計学, Vol.29, No.3, pp.141-149 (2011).
- [19] Kaji, K., Watanabe, H., Ban, R. and Kawaguchi, N.: HASC-IPSC: Indoor Pedestrian Sensing Corpus with a Balance of Gender and Age for Indoor Positioning and Floor-plan Generation Researches, *Proc. 2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication*, pp.605-610 (2013).

推薦文

本論文では、位置の取得に際して、地磁気センサによって得られる磁場情報を空間の特徴量として用いる手法を提案している。この手法は当該分野において今までにあまり研究がなされておらず、非常に先駆的な手法である。よって、論文誌に掲載するにふさわしい論文であると判断し、ここに推薦する。

(ユビキタスコンピューティングシステム研究会主査
大内一成)



村田 雄哉

2014年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2016年同大学大学院修士課程修了。スマートフォンを用いた屋内位置推定に関する研究に従事。



梶 克彦 (正会員)

2002年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。博士(情報科学)。NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト、名古屋大学大学院工学研究科助教を経て、2015年より愛知工業大学情報科学部准教授。日本ソフトウェア科学会会員。屋内位置推定、遠隔コミュニケーション支援の研究に従事。



廣井 慧 (正会員)

2004年東北大学工学部電子工学専攻卒業。同年東日本電信電話株式会社入社。2011年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修士課程修了。2014年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士(メディアデザイン学)。同年名古屋大学未来社会創造機構特任助教。災害情報通信、センサネットワークの研究に従事。



河口 信夫 (正会員)

1990年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。1995年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了。同年同大学工学部助手。同大学講師、准教授を経て、2009年より同大学大学院工学研究科教授。NPO 位置情報サービス研究機構 Lisra 代表理事。モバイルコミュニケーション、ユビキタスコンピューティング、行動センシングの研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。本会シニア会員。



神山 剛 (正会員)

NTT ドコモサービスイノベーション部勤務。2003年株式会社イーゼス代表取締役、2006年同社退社、東京大学新領域創成科学研究科修士課程修了を経て、同年NTT ドコモ入社。モバイルコンピューティング、ソフトウェア省電力化、分散システムに関する研究に従事。



太田 賢 (正会員)

1998年静岡大学大学院博士課程修了。博士(工学)。1999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。共著『モバイルネットワーク』、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)

1990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。1998年よりNTT ドコモ。2016年より公立ほ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。本会シニア会員。