

歩行時の磁気センシングデータの比較による移動経路推定手法

村田 雄哉[†] 梶 克彦[†] 廣井 慧^{††} 河口 信夫^{††} 神山 剛^{†††}

太田 賢^{†††} 稲村 浩^{†††}

[†] 名古屋大学大学院 工学研究科

^{††} 名古屋大学 未来社会創造機構

^{†††} 株式会社 NTT ドコモ先進技術研究所

あらまし スマートフォンやタブレット端末の普及とともに、ナビゲーションやライフログ管理などの位置情報サービスが普及し、GPS 精度の不十分な屋内において位置情報を取得する方法が必要とされている。本研究では、磁気センサのみを利用した移動経路推定手法を提案する。屋内環境において移動経路は限られており、移動中に観測される磁気データは経路ごとに異なる。提案手法ではパーティクルフィルタを用い、候補となる経路の磁気データと推定対象の経路の磁気データを比較し、最終的にパーティクルの最も多く存在した経路を推定経路とみなす。パーティクルを時系列方向だけでなく逆方向にも移動可能にしており、経路を逆に進んだ場合にも経路を推定可能である。実環境で収集されたデータをもとに評価実験を行った。3 種類の候補経路から経路を推定する場合、推定経路の正解率は約 97%であった。

キーワード 経路推定, 屋内測位, 磁気, スマートフォン

Pedestrian Route Estimation Method using Magnetic Data

Yuya MURATA[†], Katsuhiko KAJI[†], Kei HIROI^{††}, Nobuo KAWAGUCHI^{††}, Takeshi

KAMIYAMA^{†††}, Ken OHTA^{†††}, and Hiroshi INAMURA^{†††}

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{††} Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University

^{†††} Research Laboratories, NTT DOCOMO, Inc.

Abstract Because GPS has poor accuracy indoors, indoor positioning method is required. In this research, we propose pedestrian route estimation method using magnetic. The route is limited in indoor environment and every route has different magnetic. We walk the route and collect the magnetic, and utilize them for route estimation. As estimation method, we adopt particle filter. We estimate the route by comparing candidate route data and observed data by particle filter. We evaluate this method in real environment. The result shows that the route is estimated in high accuracy better than 97% as far as there are few candidates.

Key words route estimation, indoor positioning, magnetic, smartphone

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及に伴い、ナビゲーションやライフログ管理などの位置情報サービスが広く利用され始めた。屋外における利用者の位置情報の取得は、GPS の利用が一般的である。しかし屋内においては、GPS の精度が不十分であるため、GPS による位置情報の取得は困難である。そのため、GPS を用いない、屋内における位置情報取得方法

が必要である。そこで、RFID や無線 LAN に基づく位置推定、加速度・角速度センサを用いた歩行者デッドレコニング、それらを統合した手法が研究されている [1] ~ [6]。本研究では、磁気センサのみを利用した屋内位置推定の実現を目指している。様々な屋内位置推定手法が提案されている中で、磁気のみを用いた屋内位置推定精度の追求は十分にはなされていない。磁気のみで十分な精度の位置推定が可能になれば、省電力や低コスト化が期待できる。

本稿では、磁気による屋内位置推定の前段階として、磁気センサのみを用いた移動経路推定手法を提案する。多くの屋内環境において、移動できる経路のパターンは少数に限られている。また、建物の残留磁気の影響により、移動中に観測される磁気データ系列は経路ごとに異なると考えられる。そこで、候補となる経路の磁気データ系列と推定対象の経路の磁気データ系列を比較し、どの経路を歩行していたかを推定する。

以下に本稿の構成を述べる。まず2章では、屋内位置推定の関連研究について述べる、3章では、磁気を利用した移動経路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の結果と、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

屋内において位置情報を取得する方法に、BluetoothやRFID等のインフラを環境内に設置し利用する手法がある[1][2]。環境内に設置した発信機の電波強度やタグの情報から、位置情報を取得する。これらの手法では、対象とする環境にインフラを設置する必要があり、その導入・維持・管理コストが問題になる。既存の無線LAN基地局や建物の残留磁気を利用し、インフラにかかるコストを軽減する手法も存在する[3][4]。インフラを必要としない代わりに、これらの手法では、対象とする環境において無線LANの電波強度や磁気などのデータを事前に収集する必要がある。このデータ収集は高密度で行う必要があり、設備の更新や追加など対象とする環境内の情報が変わるたびにデータを更新する必要がある。

インフラやデータ収集を必要としない方法として、加速度・角速度等のセンサを利用する手法がある。センサにより取得された情報をもとに、直前の位置からの変位を計算し、相対的に現在位置を求める手法である。特に歩行者を対象としたものは、歩行者デッドレコニングと呼ばれ、一般的には加速度から歩数、角速度から進行方向を検出し、位置推定を行う[5][6]。近年のスマートフォンやタブレット端末には、これらのセンサが搭載されているため、それらの端末により歩行者デッドレコニングを利用できる。しかし、変異によって相対的に位置を推定するため、誤差の累積が問題となる。そのため、この手法による長時間の位置推定は困難である。

単一センサでの位置推定精度の追求は屋内位置推定のフィジビリティ向上のために欠かせない。前述のさまざまな手法を組み合わせれば、高い精度で位置推定が可能であるが、利用するインフラやセンサが増えるため、消費電力や人的コストが増加する。また、それぞれの手法が得意とする環境・不得意とする環境も存在するため、どのような環境にも適用可能な万能な位置推定手法を実現するのは困難である。よって、消費電力、人的コスト、屋内環境といった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。単一センサでの位置推定精度の向上は、位置推定手法の切り替えによる対応の柔軟性の幅を広げる可能性を持つ。しかし、これまでに磁気のみを用いた屋内位置推定精度の追求は十分にはなされていない。

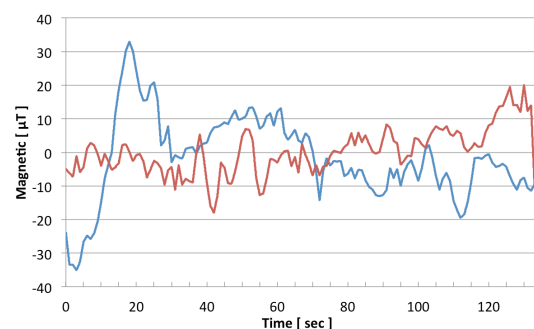


図1 異なる経路を移動した際の磁気データ系列（垂直方向成分のみ）

Fig.1 Magnetic Data of Different Route

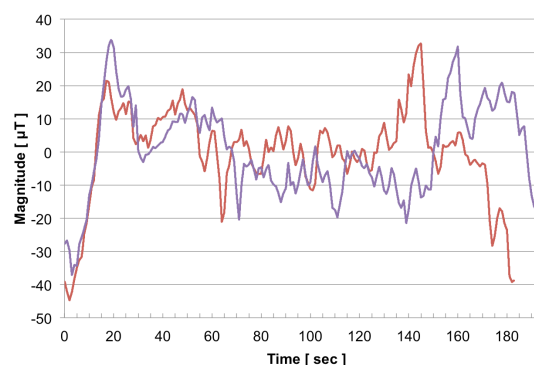


図2 同一経路を移動した際の磁気データ系列（垂直方向成分のみ）

Fig.2 Magnetic Data of Same Route

3. 移動経路推定手法

本研究では磁気に着目し、磁気センサのみを用いた屋内位置推定の追求を目標とする。磁気による屋内位置推定の前段階として、経路推定手法を提案する。

多くの建物内において、ある地点から目的地までの移動経路は限られている。駅構内の移動を例に考えると、ある出入口からホームに至る経路はいくつか考えられるが、その数は少ない。また、本稿では広間のような自由な経路で移動できる空間は推定対象外とする。広間のような空間では移動経路のパターン数が膨大になるためである。

建物の残留磁気の影響により、異なる経路の移動によって得られる磁気データ系列は異なるが、同一経路の移動によって得られる磁気データは類似する。図1は、異なる2つの経路を移動した際に得られた磁気データ系列の垂直方向成分の例である。この図からわかるように、部分的には同じ値になる瞬間もあるが、全体的なグラフ形状は異なっている。これらは区別可能と考えられる。一方、図2は同一経路を移動した際の磁気データ系列を重畳したものである。移動速度の違いから、後ろに進むほど時間的なずれが認められるものの、全体的な形状が類似しているのがわかる。

提案手法では、歩行時に得られる磁気データ系列に対して、あらかじめ各経路の歩行によって収集しておいた磁気データ系列との比較を行い、移動経路を推定する。また、センサノイズ

の影響を軽減して移動経路を正確に比較するために、観測された磁気データを用いて各経路ごとの正解データを作成する。各候補経路の正解データと観測されたデータ間の比較にはパーティクルフィルタを用いる。

3.1 磁気データ系列の変換

本稿では、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、2 軸の値として扱う。絶対的な方位が得られれば、X・Z 軸成分を南北成分と東西成分に変換して 3 軸の値として扱うことができるが、多くの場合、建物の残留磁気の影響で、絶対的な方位は獲得できない。よって、磁気データを垂直方向・水平方向の 2 軸への変換を採用した。

3.2 候補経路の正解データの作成

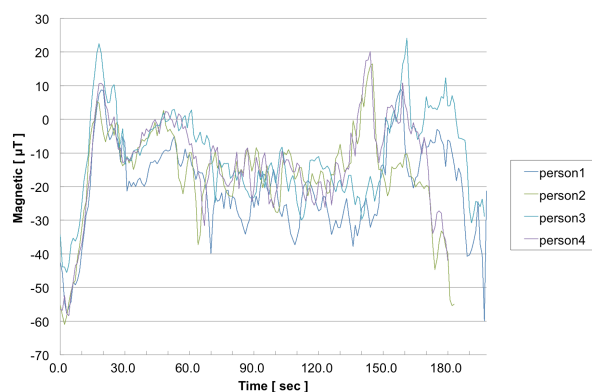
観測される磁気センサの値はノイズがのっているため、必ずしも同じ場所で同じ値が得られるとは限らない。また計測時のセンサ端末の位置や経路を移動する速度によって、観測される磁気の高さと計測時間が異なる。そこで各候補経路について、事前に観測された同一経路を移動した複数の磁気データを利用し、磁気の高さや計測時間の違いを考慮して、経路比較のための正解データを作成する。

同一経路における磁気データの大きさの違いは、センサ端末の位置の違いにより生じる。例えば身長異なる計測車の腰に装着した端末で磁気を計測した場合、地面に埋め込まれている鉄骨の残留磁気の影響は、端末が地面に近い身長の低い計測車の端末の方が強く現れる。ただし腰の高さの個人差は相対的な磁気の変化量が大きく異なるほどではないため、腰の高さが違っていても、磁気データ系列のグラフ形状はオフセット値の加減算によってほぼフィッティングできる。そこで、観測された 3 軸の磁気データ系列全体から平均値を算出し、その値を減算して相対的な磁気の変化のみを用いる。図 3 にその結果を示す。図 3(a) は処理前、図 3(b) は処理後の垂直方向成分の磁気データを表している。図 3(a) では各データの極大値・極小値がばらばらだが、図 3(b) では極大値・極小値が処理前よりも揃っているのがわかる。

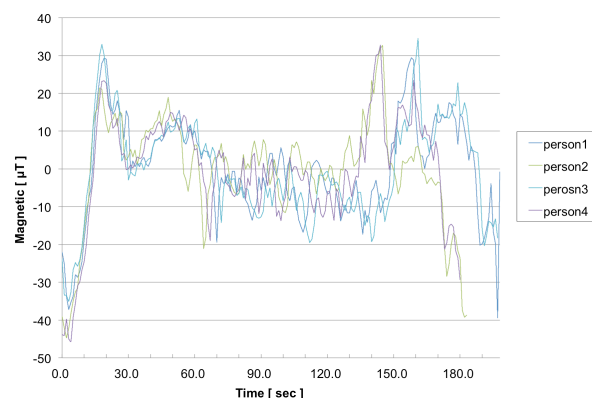
次にローパスフィルタを用いて磁気センサのノイズ除去を行う。本稿ではノイズ除去に平均フィルタを使用した。

計測時間は、計測者の移動速度によって異なるため、計測時間を揃える。本稿では、計測者は一定速度で止まらずに移動していると仮定する。まず正解経路のもととなる基本経路を複数経路から一つ選択する。その基準経路の計測時間を基準時間として、他の経路の計測時間を揃える。例えば基準経路の 2 倍の計測時間のデータを揃える場合、まず時間を 1/2 にして開始から終了までの時間を同一にする。次にサンプリングレートを揃えるため、基準経路の各観測時刻に最も近い観測データのみを取り出していき、観測データの間引きを行う。その結果を図 4 に示す。図 4(a) は調整前、図 4(b) は調整後の磁気データを表している。極大値と極小値の時間的なずれが軽減されているのがわかる。

これらの処理を行った後、同一経路を移動した複数の磁気



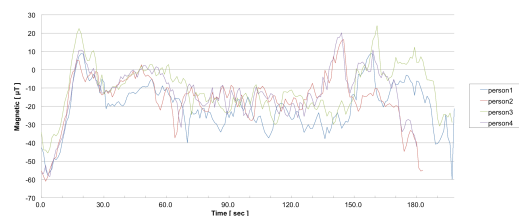
(a) 処理前の磁気データ (垂直方向)



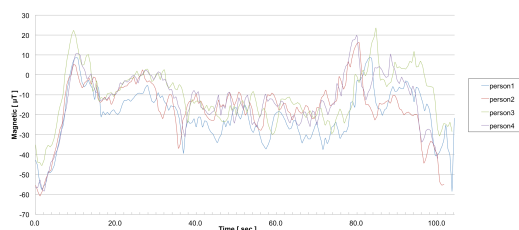
(b) 処理後の磁気データ (垂直方向)

図 3 磁気データの大きさ合わせ

Fig. 3 Size Adjustment of Magnetic Data



(a) 処理前の磁気データ (垂直方向)



(b) 処理後の磁気データ (垂直方向)

図 4 磁気データの時間長合わせ

Fig. 4 Time Adjustment of Magnetic Data

データ系列について各観測時刻の平均値をとり、正解データとした。

3.3 移動経路推定

移動経路の推定には、パーティクルフィルタを利用する。パーティクルフィルタは時系列フィルタの一種であり、ノイズを含む観測値から尤度に基づいて対象の状態を推定する手法

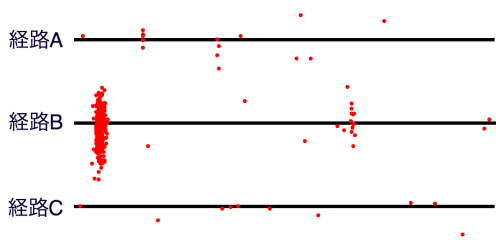


図 5 パーティクルフィルタによる移動経路推定
Fig.5 Route Estimation with Particle Filter

である．時系列データの比較には，パーティクルフィルタの他に DP マッチングが利用されるが [8]，本研究の最終目標である磁気に基づく屋内位置推定への発展を視野に入れ，パーティクルフィルタを採用した．部分的な経路や逆方向に歩いた経路についても推定可能にするため，経路の開始地点と終了地点に関する前提知識は用いない．入力する推定経路の磁気データ系列は，候補経路の正解データ作成と同様の前処理を行い，ノイズ除去と平均値の減算処理を行う．ただし計測時間を揃える必要はないため，その処理は行わない．

パーティクルは各候補経路の磁気データの各時刻上にランダムに撒かれた状態からスタートする．以降，推定経路の磁気データ系列を時系列順に参照し，その瞬間の磁気データの値と各パーティクルが存在する箇所の磁気データの値を比較する．各パーティクルは自身の存在する尤度を計算し，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していく．パーティクルフィルタでは，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，ステップを繰り返していく．以下に各処理の詳細を述べる．

3.3.1 予測

次ステップに移行する際，各パーティクルは自身の位置を更新する．パーティクルはいずれかの正解経路のいずれかの観測時刻に存在している．その観測時刻から -50ms から $+50\text{ms}$ の間でランダムにパーティクルを移動させる．マイナス方向の移動を許しているのは，逆方向の経路移動も同時に推定を行いたいためである．

3.3.2 尤度計算

現在参照中の推定経路の磁気データの値と各パーティクルの存在する箇所の磁気データを利用して，尤度を計算する．パーティクルの尤度は，水平方向の磁気データに対する尤度と垂直方向の磁気データに対する尤度の積で求める．推定経路の磁気データの値と類似するほど尤度は高くなる．磁気ノイズは正規分布に従うと仮定し，尤度の計算には一般的な正規分布の式を

表 1 経路データ (名古屋大学駅)

Table 1 Route Data (Nagoya Daigaku Station)

被験者数	4 名
経路数	3 経路
1 経路あたりの平均データ数	12 個
端末	Nexus4 (Android 4.2.1)
端末装着位置	腰前方中央

表 2 経路データ (HASC-IPSC)

Table 2 Route Data (HASC-IPSC)

被験者数	50 名
経路数	10 経路
1 経路あたりの平均データ数	5 個
端末	Nexus4 (Android 4.2.1)
端末装着位置	腰後方中央

用いる．正規分布に基づく尤度計算の際に，磁気ノイズの標準偏差が必要である．予備実験の結果，磁気ノイズの標準偏差は $3 \mu\text{T}$ であった．ここでの尤度の意味は，そのパーティクルの存在箇所が正解であると仮定した場合，上記のレベルで磁気ノイズが発生する環境において，推定経路の磁気データの値が得られる確率を表す．全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った．

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，パーティクルを撒きなおす．パーティクルの持つ尤度と閾値を比較し，尤度が閾値を上回った場合はパーティクルを残し，下回った場合はパーティクルを削除する．閾値の値は，経験的に 2.0×10^{-3} とした．削除され減少した数だけ，高い尤度を持つパーティクルの付近に新たなパーティクルを撒きなおす．このとき，局所解への収束を防ぐために一定数のパーティクルは経路全体にランダムに撒きなおす．本稿ではランダムに撒きなおすパーティクル数を経験的に 5% とした．

3.3.4 パーティクルフィルタ履歴に基づく経路推定

予測・尤度計算・リサンプリングのステップを観測データ系列をひと通り参照するまで繰り返す．その様子を図 5 に示す．この際，各ステップにおいてそれぞれの候補経路に存在していたパーティクル数をカウントする．最終的に最も多くのパーティクルが存在していた候補経路を，推定経路と同一であるとみなす．

4. 評価実験

4.1 実験内容

提案手法を用いて，移動経路推定の評価実験を行った．評価実験は，名古屋大学駅で収集したデータと，HASC-IPSC [9] の 2 種類で行った実験に利用したデータの概要を，表 1 と表 2 に示す．データ収集の際，被験者は経路を止まることなく一定の速度で移動している．HASC-IPSC には，建物内を移動した全 56 経路のセンサデータが含まれる．提案手法では経路ごとに観測される磁気の違いを利用するため，本実験では途中経路が重

表 3 移動経路推定結果 (名古屋大学駅)

Table 3 Estimation Result (Nagoya Daigaku Station)

入力パターン	平均推定精度 [%]
経路全体 (通常)	100
経路全体 (反転)	100
経路半分 (通常前半)	91
経路半分 (通常後半)	100
経路半分 (反転前半)	100
経路半分 (反転後半)	94.6

表 4 移動経路推定結果 (HASC-IPSC)

Table 4 Estimation Result (HASC-IPSC)

入力パターン	平均推定精度 [%]
経路全体 (通常)	36
経路全体 (反転)	36.8
経路半分 (通常前半)	37.2
経路半分 (通常後半)	29.6
経路半分 (反転前半)	30.4
経路半分 (反転後半)	38.8

複していない 10 経路を選択し利用した。

収集したデータを利用し、各経路ごとに正解データを作成した。正解データの作成には、平均 4 人分のデータを利用している。入力するデータとしては観測した生データの他に、反対方向からの移動を想定し、観測したデータの時系列を反転させたもの、それぞれのデータを半分に分割し、その前半、後半に分けた部分経路データを含めた 6 パターンを利用した。これらのデータと各経路の正解データを用い、移動経路推定を行った。

4.2 実験結果

提案手法を用いて、移動経路推定を行った。その結果を表 3 と表 4 に示す。経路全体 (通常) は観測時と同様に時系列順にデータを入力した場合、経路全体 (反転) は経路を反対方向に進んだ状態を想定し、観測時とは時系列を反転させてデータを入力した場合を示す。パーティクルフィルタは、実行ごとに結果が異なる。そのため、各入力パターンに対し、5 回ずつ提案手法を用いて経路推定を行った。表の値は、推定精度の平均値を表している。

4.3 考察

評価実験では、観測データを反転した場合や観測データの途中から入力した場合であっても、候補となる経路が少なければ正しく移動経路推定が行えると確認できた。しかし、推定途中においては、実際とは違う経路を移動中の経路にパーティクルが集中する場面も確認された。これは、本稿では尤度の計算に磁気のみを利用しており、経路において類似の値を持つ箇所が多いためだと考えられる。そのため、候補となる経路の数が増えれば、それだけ類似の磁気値を持つ箇所が多く存在する可能性が増え、推定誤りにつながる。これは、表 4 から確認できる。

また、経路の長さも精度に影響すると考えられる。評価実験で利用した経路の平均移動時間は、HASC-IPSC では 71.8 秒、名古屋大学駅では 125.4 秒であった。提案手法では、最も多く

のパーティクルが存在していた経路を移動経路と推定する。そのため、経路が短いほど各時点におけるパーティクルの推定誤りの影響を大きく受ける。評価実験において、データ系列を半分にして入力した際に推定精度が悪化する場面がみられた。これは、データ数の減少により各時点におけるパーティクルの推定誤りの影響が大きくなったためだと考えられる。これらの結果から、経路の長さは推定精度に影響を与えていると確認できる。

5. おわりに

本研究では、磁気センサを利用した移動経路推定手法を提案した。屋内において移動できる経路は限られており、移動中に観測される磁気データは経路ごとに異なるため、提案手法では移動中に観測される磁気データ系列同士の比較により移動経路の推定を行った。移動経路の推定手法として、パーティクルフィルタを採用した。候補経路の磁気データ系列と推定対象の経路の磁気データ系列を比較し、パーティクルフィルタの履歴から最終的にパーティクルが最も多く存在していた候補経路を推定経路とした。評価実験には、実環境で収集したデータを利用した。3 つの候補経路の場合、経路の途中からのデータや反転させたデータを入力した場合を含め約 97% の精度で経路推定が可能であった。しかし、候補となる経路が増加した場合や経路の長さが短い場合においては、経路において類似の値を持つ箇所が増加する可能性や推定誤りのパーティクルの影響が大きくなり、推定精度が低下することが確認された。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- 推定精度の向上

本研究では、各経路に集まったパーティクルの総数により移動経路を推定した。観測データと、各候補経路の正解データの磁気値が近いところにパーティクルが集中する。そのため、類似の値が他の経路上に多く存在すれば、それだけ推定を誤る可能性が大きくなる。精度向上のためには、他の特徴量を利用、もしくはパーティクルに他の状態を持たせる必要があると考えられる。

- 端末姿勢の推定

本稿で行った評価実験では、端末は歩行者の腰の前方中心に固定されている。しかし、実環境で歩行者は様々な位置に端末を保持している。保持位置ごとに端末の姿勢は異なると考えられ、移動中に端末を利用した場合には、その姿勢が変わる可能性も考えられる。そのため、端末の保持位置とその際の端末の姿勢を考慮に入れる必要がある。

- 正解データ作成方法の見直し

評価実験で利用した正解データの作成は、同一経路を移動した複数の磁気データの平均をとって作成した。各データに対して磁気の大きさや計測時間の違いを軽減する処理を行い、その効果を確認した。しかし、まだ調整がきかれておらず、依然として違いが見られる箇所が多く存在した。正解データの精度は移動経路推定の精度に直結するため、更に精度の高い作成方法の検討すべきと考えられる。

文 献

- [1] 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", 電子情報通信学会技術研究報告. USN, コピキタス・センサネットワーク, vol.108, no.138, pp.147-152, 2008.
- [2] 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. UBI, [コピキタスコンピューティングシステム], vol.2004, no.66, pp.31-38, 2004.
- [3] 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, 2011.
- [4] 坂涼司, 梶克彦, 河口信夫, "磁気と WiFi 電波強度を含んだマップ情報に歩行者デッドレコニングを併用した屋内位置推定手法", 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報, vol.113, no.113, pp.23-28, 2014.
- [5] 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.
- [6] 五百蔵重典, 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, pp.723-735, 2013.
- [7] Kaji, K., Watanabe, S., Hodaka, W., Ban, R., Kawaguchi, N., "HASC-IPSC: Indoor Pedestrian Sensing Corpus with a Balance of Gender and Age for Indoor Positioning and Floor-plan Generation Researches", International Workshop on Human Activity Sensing Corpus and Its Application (HASCA2013), pp.605-610, 2013.
- [8] 山本通宏, 上岡英史, "加速度センサを用いたパターンマッチングによる移動状態推定", 電子情報通信学会技術研究報告. MoMuC, モバイルマルチメディア通信, vol.110, no.376, pp.67-72, 2011.
- [9] HASC-IPSC. <http://hasc.jp/ipsc/>