

# 空間統計的解析手法を用いた歩行者GPSデータの補正アルゴリズムに関する研究

薄井 智貴<sup>1</sup>・山本 俊行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター 特任講師

(〒464-8603名古屋市千種区不老町) E-mail: usui@gvm.nagoya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋大学エコトピア科学研究所 教授

(〒464-8603名古屋市千種区不老町) E-mail: yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

近年、衛星測位機器の普及、情報通信技術の発達により、GPS測位等による空間座標データの取得が容易になっている。これらデータは、人々の詳細な行動経路や滞在場所を示す貴重なデータである一方で、誤差が多く品質が不均一な座標アンサンブルデータであり、行動分析の基礎データとなるような価値のある情報をいかにして抽出するか、また測位誤差を低減できるかが課題となっている。本研究においては、ベイズ統計手法の一つであるパーティクル（粒子）フィルタアルゴリズムをベースとして、その運動方程式や尤度関数に独自の改良を加え、より尤もらしい行動経路の抽出とGPS誤差の除去を目的としたアルゴリズムの提案を行う。

**Key Words :** ParticleFilter, GPS, Probe Data, Spatial-Statistics

## 1. はじめに

近年、衛星測位機器の普及、情報通信技術の高度化、情報通信網の発達により、様々なデバイスや計測手法によって、人々の詳細な行動経路や滞在場所を示す「位置情報」の取得が容易になっている。この「位置情報」は、衛星測位装置（通称、ロガーと呼ばれている）や車載器などから取得できるGPSデータをはじめ、携帯電話やスマートフォン等から取得できるA-GPSデータ、携帯キャリアで自動取得されているAUTO-GPSデータや基地局データ、Wi-FiやBluetooth、IMESなど専用装置から得られる屋内外測位データ、twitterやFacebook、foursquareに紐づけられた位置データなど様々なものがある。これらのデータの大半は、時刻や緯度経度で表される座標アンサンブルデータではあるものの、そのフォーマットやセンサの種類、取得頻度、測位精度など、仕様は多種多様であり、統一的に扱いにくいデータとなっている。そのため、様々なデバイスから取得される膨大な座標アンサンブルデータから価値のある情報のみを抽出し、行動分析の基礎データとして有効活用するための効率良い処理手法を確立することが昨今の重要な課題となっている。また、これらの位置情報群は、

GPS測位誤差や屋内・地下における受信強度の低下、機器・マルチパスによる誤差、データ頻度や精度の不均一性など、様々な誤差データも含まれているため、誤差の要因特定や外れ値の除去、滞留判定に関する技術の確立もまた必要不可欠な課題となっている。

こうした問題に対し、これまで主に情報系分野や土木・交通系分野などにおいて、マップマッチング技法やデータマイニング技法を用いた位置補正手法に関する研究が数多く行われてきた。前者の道路ネットワーク地図をベースに経路の推定や誤差を修正する方法（これをマップマッチングという）としては、例えば、朝倉ら<sup>1</sup>は、得られたGPS観測データから一定の半径以内の道路ネットワークリンクをすべて抽出し、その結果から生成したリンク集合を用いて起終点間の経路の特定を行っている。また、小島ら<sup>2</sup>や三輪ら<sup>3</sup>は、観測データから最近道路ネットワークリンクを抽出し、順次暫定的な吸着処理をおこない、暫定リンクを逐次最短経路探索することで経路を求めている。ただし、これら道路ネットワーク地図をベースにした処理では、歩道や細街路、自由空間（非道路空間）などを移動する可能性のある、歩行者や自転車の行動履歴などを捉えることができず、また、

鉄道なども利用したマルチモーダルでの行動に対しては適用が困難で、行動挙動を捉えるための補正や経路特定としては適していない。

一方で、道路ネットワーク地図を利用しない技法としては、例えば、長尾ら<sup>4)</sup>は、GPSロガーから収集した各座標間の距離、時間データから移動速度を算出し、その移動速度からGPSデータのエラー除去や滞在判定を行い、さらに補正が必要なGPSデータについては平均経緯度への補正を行っている。また、多田ら<sup>5)</sup>はGPS受信機から得られる非連続データに対し、拡張カルマンフィルタを用いて磁気センサデータとの統合処理を行い、非測位区間の経路を推定しているが、磁気センサデータが必要な点と、GPS欠損率が高い場合の推定結果において改善の余地がある。

これらを踏まえ本研究では、歩行者の挙動分析のための行動経路を推定することを目的としているため、後者の多田ら<sup>5)</sup>のような、道路空間に依存しない自由空間における安定したデータ補正を実現するためのアルゴリズムを提案する。補正に際しては、多種多様なデータに対応するため、取得デバイスや測位手法に関わらずすべてのデータに含まれている時刻と経緯度情報のみを対象としたパーティクルアルゴリズムによる、行動経路を特定する手法を検討する。

## 2. パーティクルフィルタアルゴリズム

パーティクルフィルタ<sup>6)</sup>とは、直接観測できない状態を、状態空間の中に発生させた多数のパーティクル（粒子）の確率分布により状態を近似し、得られた観測値で粒子の値を時間更新することで次の状態を推定する手法である。観測モデルとして非線形の任意のモデルを適用できるため、画像などの観測過程が複雑なコンピュータビジョン等で多く用いられている。近年、コンピュータによる高速演算処理が可能になったこともあり、画面上での対象物の追跡や輪郭追跡などにおいて適用され、土木計画分野においても、シミュレーションモデルと観測データの同化やモデルパラメータの推定などへの援用<sup>7)</sup>が着目され始めている。

本研究においては、誤差の多いGPS観測データから誤差を低減し、真値を推定するためにパーティクルフィルタを利用する。具体的には、2次元空間を仮定し過去の観測データを事前分布として、多数のパーティクルアンサンブルを用い

て現時刻での状態を推定し、入手した観測データとの尤度の高さにより推定値を確定することでベイズ的に行動経路を特定していく。以下にアルゴリズムを示す。

パーティクルフィルタは、時系列フィルタの一種で、状態の変化を表す状態モデル（式(1)）と、状態から観測値を得るための観測モデル（式(2)）の2つが対となり一般状態空間モデルを構成し、これらを時間更新することで推定値を得る。

$$x_t = f_t(x_{t-1}, v_t), \quad \dots \text{状態モデル(1)}$$

$$y_t = h_t(x_t, w_t). \quad \dots \text{観測モデル(2)}$$

離散時刻 $t$ の状態推定ベクトル $x_t$ は、一時刻前の状態推定値 $x_{t-1}$ と、現在の値への更新プロセス時にかかるシステムノイズ $v_t$ で表しており、また、離散時刻 $t$ の観測ベクトル $y_t$ は、時刻 $t$ および混在する観測ノイズを $w_t$ で表している。この式(1)(2)のモデルを条件付き確率分布で表したものを式(3)(4)に示す。

$$x_t \sim p(x_t | x_{t-1}), \quad \dots \text{状態モデル(3)}$$

$$y_t \sim p(y_t | x_t). \quad \dots \text{観測モデル(4)}$$

この状態空間モデルを用い、観測系列 $Y_t$ が所与のもとでベイズの定理を用いて時刻 $t$ における期待値（事後分布） $p(x_t | Y_t)$ を求める（式(5)）。

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | x_t)p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad \dots (5)$$

このとき、右辺分子の $p(y_t | x_t)$ は観測モデルであり、 $p(x_t | Y_{t-1})$ は予測モデルを表している。この予測モデルを積分計算可能なように書き換えることにより式(6)が得られる。

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1})p(x_{t-1} | Y_{t-1}) dx_{t-1} \quad \dots (6)$$

ここで、状態モデル、観測モデルが線形で、 $v_t$ と $w_t$ のノイズが、線形ガウス分布を仮定したものが、カルマンフィルタであり、任意の非線形・非ガウス分布を仮定したものの一つが、パーティクルフィルタである。

次に、実際の計算を行うにあたり、パーティクルフィルタの詳細なアルゴリズムの流れを示す。まず、一時刻前 $t-1$ の状態をもとにパーティクル群 $p(x_{t-1} | Y_{t-1})$ を生成し任意の分布によ

り拡散する。これを事前分布とする①。次に、状態モデルにランダム雑音を加えることでパーティクルの位置を更新する②。この後、新しい観測値 $y_t$ が入り、各パーティクルに対し、観測値との重み（尤度）を計算する③。最後に、この与えられた重みをもとに、パーティクルのフィルタリング操作を行う④。このフィルタリングでは、尤度の高いパーティクルのみ再びサンプリングし、低いものに関しては消滅させる。このとき、残ったパーティクル群の尤度の重み付き平均にてその時刻の状態推定値を得る。以後、この①～④を時刻を更新しつつ観測データ数分繰り返していく。

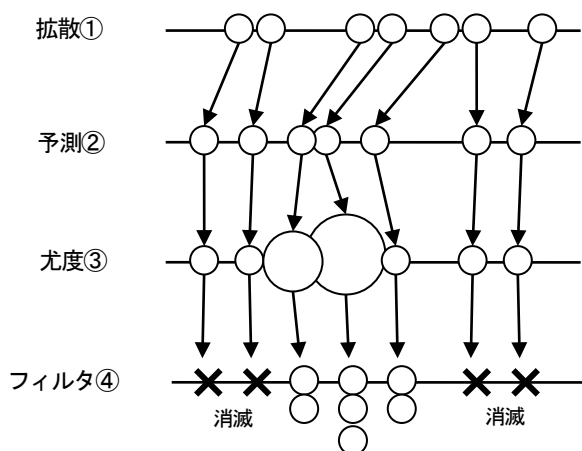


図-1 パーティクルフィルタ概念図

### 3. 本研究におけるパーティクルフィルタの適用

本研究においては、パーティクルフィルタ手法を用いて歩行者GPS測位データの補正を行うことを目的としている。そのため歩行者の行動特性を踏まえ、独自のモデルを定義している。

#### (1) 観測モデル（尤度）の設定

観測モデルは、真値とどれくらい適合しているかを評価する必要があり、本研究においては、以下、式(7)の式を用いて尤度を定義した。

$$p(y_t|x_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{dis_t^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots (7)$$

このとき、 $dis_t$  は観測点とパーティクルの距離を、 $\sigma$  は分散を表しており、パーティクルと観測値との離れ具合により評価している。

#### (2) 状態モデル（予測モデル）の設定

通常、アンサンブルカルマンフィルタ等においては、ガウス分布を仮定したり、あるいは長坂ら<sup>8)</sup>のようにランダムウォークを仮定し運動方程式を適用している例が報告されているが、本研究においては、歩行者は目的に向かって時速4kmで等速で進むと仮定して、等速直線運動方程式を用いた。

### 4. 分析用実験データ

パーティクルフィルタの精度を検証するため、以下のような分析用データを用意した（表-1）。データは、名古屋大学東山キャンパス内において徒歩により回遊することで取得しており、比較的測位精度の高いGPSロガーを用い、30秒毎の測位データとなっている。今回の実験地域と実際に通ったルートとGPSロガーによって観測された測位データを図-2に示す。測位データは、比較的高い建物の側を通った時以外はおおむね精度よく取得できており、明らかな外れ値はごくわずかで、その他は許容範囲内の1m程度の誤差に収まっていた（図-3）。ただし、今回確認表示用に用いたGoogleMapsにも場所によっては真の経緯度と多少の誤差がある点にも注意が必要である。

表-1 検証用GPS測位データ

項目	データ
データ範囲	名古屋大学東山キャンパス
データ取得日時	2012年4月25日 16:34-17:44 曇り
データ取得頻度	30秒毎
データ取得機器	GPSロガー BT-Q1300
GPSサンプル数	140 point

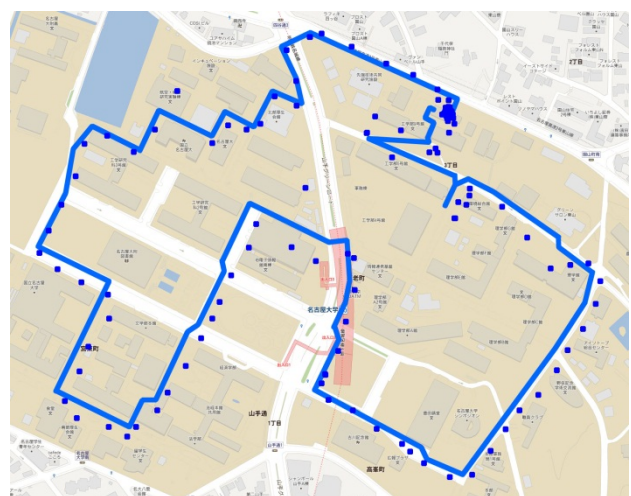


図-2 検証データの実際に通ったルート（実線）と観測点（丸ポイント）



図3 GPSの観測誤差が見られた部分

## 5. 検証結果

前提条件として拡散パーティクル数1000, 歩行者速度を4km/hとし, 取得した実測値に対しパーティクルフィルタ処理を行った(図4). 結果, GPS誤差が大きい箇所の推定経路結果への影響も軽減され, また実際に走行したルートと推定結果との誤差もおおむね妥当な範囲に収まっており, パーティクルフィルタを活用したGPSデータ処理の可能性を示した.

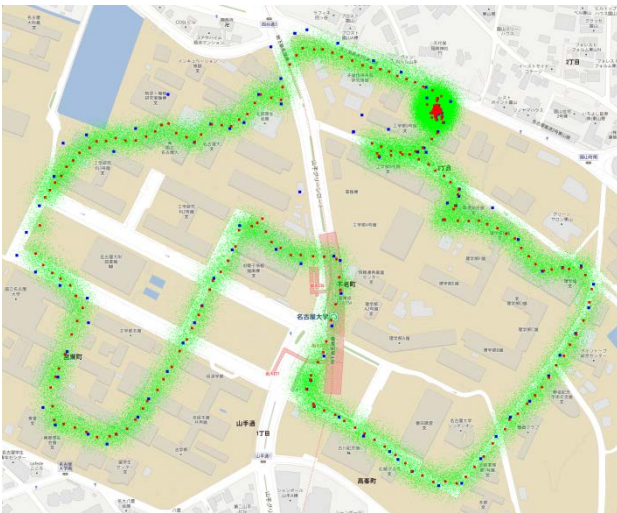


図4 パーティクルフィルタ結果 (青四角: 観測点, 赤丸: 推定結果, 緑点: 散布したパーティクル)

## 6. まとめ

本研究では, 道路空間に依存しない自由空間における安定したGPSデータの補正と行動経路推定を実現するため, パーティクルフィルタアルゴリズムに独自の確率分布を与え, 実観測データをも

とに検証を行った. 今回, 観測モデルに距離による尤度を, また状態モデルに等速直線運動を仮定し, 処理を行った結果, おおむね妥当な推定結果が得られる可能性を示した. ただし, GPS誤差が連続して複数個ある場合は, 推定結果がそれらにかなり引っ張られるため, 推定誤差も大きくなる可能性があることが分かった. パーティクルフィルタは, どのような非線形・非ガウス分布の状態推定にも適用可能な性質を持ち, 観測モデルについても尤度関数さえ適切な定義ができれば推定できる一方で, この尤度関数と状態モデルをどう設計するかが重要な鍵となる. 今後, 様々な条件下で取得したGPSデータに対し, 有効な関数とモデルを定義していく必要があると考える.

謝辞: 本研究は, 文部科学省科学研究費若手(B)[研究課題番号 23760471]の支援により実施したものである.

## 参考文献

- 1) 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳: PHSによる位置情報を用いた交通行動調査手法, 土木学会論文集, No.653/を用いた, pp95-104, 2000.
- 2) 小島英史, 羽藤英二: プローブパーソンデータによるオンラインマップマッチングアルゴリズム, 土木計画学研究・講演集, Vol.29, CD-ROM, 2004.
- 3) 三輪富生, 木内大介, 山本俊行, 薄井智貴, 森川高行: 低コストプローブカーデータのオンラインマップマッチング手法の開発, 交通工学, Vol.44, No.3, pp.100-110, 2009.
- 4) 長尾光悦, 川村秀憲, 山本雅人, 大内東: GPSログマイニングに基づく観光動態情報の獲得, 観光と情報, 第1巻, 第1号, 2005.
- 5) 多田俊也, 赤羽弘和: GPSおよび磁気センサによる人の移動軌跡の連続推定, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, CD-ROM, 2009.
- 6) Kitagawa, G.: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, Journal of Computational and Graphical Statistics, vol.5, No.1, pp.1-25, 1996.
- 7) 三谷卓摩, 羽藤英二: パーティクルフィルタを用いた空間データの自動作成法, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, CD-ROM, 2009.
- 8) 長坂康史, 金子尚人: アクティブ RFID 技術を用いた移動体位置推定アルゴリズムに関する研究, 広島工業大学紀要研究編, 第43巻, pp299-304, 2009.

(2012.5.7 受付)