

歩行者軌跡データへの効率的な位置補正手法の適用*

A Study on Error Correction Technique by Tracking Pedestrians*

三谷卓摩**・羽藤英二***

By Takuma MITANI**・Eiji HATO***

1. はじめに

近年、ETCデータ、交通系ICカード、プローブパーソンデータ、BCALsなどの様々なセンサーネットワークによってリアルタイムな交通状況や交通行動の入手が可能となりつつある。こうしたデータは交通管制や交通計画においても有益なものとなりつつあり、従来型の交通量配分やマクロなシミュレーションでは明示的に取り扱うことができなかった動的で、しかも信号現示や道路構造の変更といった施策への活用が期待されている。

しかし、生データのままで、平面上での位置特定が不十分であるため、交通手段や経路の特定など限定的なものになっていること、移動中の追従行動のような加減速の状況や車線変更などの特定は困難であること、逐次データで量が膨大になることから効率的なデータ処理が必要となるといった課題が残されている。

そこで本研究では画像解析などで用いられているパーティクルフィルタという手法で、時刻 t ごとに取得された X , Y データを精度よく補正し、マイクロ交通シミュレーションを併用しながら空間データの作成を行うことを本研究の狙いとした。

2. パーティクルフィルタを用いた位置補正

位置データで分析を行う場合、マップマッチングによって、観測されたデータを補正し、実際の観測地点の通過時刻や経路を特定することが一般的である。しかし、高層ビルの乱立する都心部や速度が低下している交差点近傍では、誤差によるばらつきが有意になることがあるため、誤ったマップマッチングが発生しやすい。そこで、時系列フィルタリングのひとつであるパーティクルフィルタを用いることで、交差点近傍でのマップマッチングの精度向上を図ることを目的とする。

*キーワード：パーティクルフィルタ、マイクロシミュレーション、プローブパーソン

**正員，博(工)，東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
(東京都文京区本郷七丁目三番地一号工学部十四号館，
TEL:03-5841-1672, E-mail:mitani@bin.t.u-tokyo.ac.jp)

***正員，博(工)，東京大学大学院工学系研究科

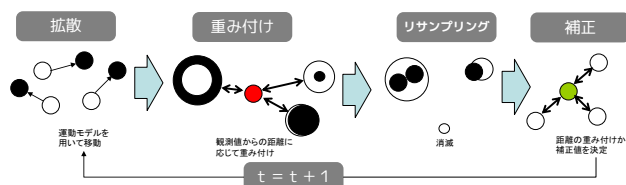


図1 パーティクルフィルタの概念図

(1) パーティクルフィルタの概要

パーティクルフィルタは、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¹⁾。本研究では、2次元空間上で過去の観測データを事前分布として与え、パーティクルの集合を用いて現時刻での観測データを推定し、尤度の高さにより位置を補正することでベイズ的に経路を推定していく。

時刻 t における観測値 θ_t から状態ベクトル x_t の事後確率である確率密度関数 $P(x_t|\theta_t)$ を推定する。この事後確率 $P(x_t|\theta_t)$ は、ベイズの定理により以下の式(1)に置換できる。

$$P(x_t|\theta_t) = \frac{P(y_t|x_t) \cdot P(x_t|\theta_{t-1})}{P(y_t|\theta_{t-1})} \quad (1)$$

$$P(x_t|\theta_{t-1}) = \int P(x_t|x_{t-1}) \cdot P(x_{t-1}|\theta_{t-1}) dx_{t-1} \quad (2)$$

まず、 $t-1$ の状態をもとに抽出されたパーティクル群 $P(x_{t-1}|\theta_{t-1})$ を選択し、対象領域に拡散する。これを事前分布とする。つぎに、運動モデル $P(x_t|x_{t-1})$ を用い、パーティクル群を一定の規則に基づいて誤差を加えた形で移動させる(拡散)。この運動モデルに関しては、後に説明する。さらに、各パーティクルに対し、その尤度を計算する(重み付け)。重み付けについても後ほど説明する。最後に、リサンプリングを実施することで、尤度の高いパーティクルについては複数個サンプリングされ、低いものに関しては消滅する。このとき、尤度の最も高いパーティクルが集中する位置を推定値としてプローブデータの位置を確定する。以後、プローブデータが観測され

るたびに計算を繰り返し、プローブデータの観測点を補正していくことができる。

(2) 運動モデル

パーティクルフィルタでは、推定対象の動作特性をモデル化したもので、モデルの精度を左右するものである。

長坂ら²⁾は、アクティブRFIDタグを利用した移動体のリアルタイム位置推定にパーティクルフィルタを用いたアルゴリズムを考案している。この研究では、歩行者の行動は、運動モデルの予想が困難であるため、運動モデルにランダムウォークを仮定し、拡散項に過去の移動状況を学習させる運動モデルを提案している。しかし、本研究では移動手段として自動車での移動を対象とするため、運動モデルに移動を考慮したうえで、速度が低下している交差点近傍で位置補正を行う際、誤差項が小さくなるように定式化を行った。現時刻 t における番目のパーティクルの状態ベクトル x_t の運動モデル式 (3) を以下に示す。

$$x_t^i = \begin{bmatrix} a_t \\ b_t \\ Va_t \\ Vb_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{t-1} \\ b_{t-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \cdot Va_{t-1} \cdot t_{interval} + Va_{t-1} \cdot \varepsilon \\ \alpha \cdot Vb_{t-1} \cdot t_{interval} + Vb_{t-1} \cdot \varepsilon \\ \beta \cdot t_{interval} \cdot \xi \\ \beta \cdot t_{interval} \cdot \xi \end{bmatrix} \quad (3)$$

(a, b) は2次元平面座標、 (Va, Vb) は速度を表す。 α 、 β は分散の大きさを表すパラメータであり、 $\varepsilon \sim N(1, \sigma^2)$ 、 $\xi \sim N(0, \sigma^2)$ は正規乱数をあらわしている。

(3) 重み付け

重み付けは、観測モデルを用い、パーティクルの重みを評価する。観測モデルは、あらかじめ状態空間内で観測される値の分布状況を測定し、これを学習データとしてモデル化したものである。観測モデルでは、現時刻における観測値と、パーティクルが示す状態量を入力する。入力した状態量において、入力した観測値が観測される確率密度を求める。この確率密度から、そのパーティクルが示す状態量における移動体の存在尤度を決定し、重みに反映する。

本研究では薄井ら³⁾と同様に、各パーティクルから現時刻 t における観測値 y_t までの距離の逆数を尤度とした。



図2 天山交差点の周辺図とネットワークの設定

3. プローブパーソン調査結果への適用と検証

提案したパーティクルフィルタによる位置補正を用いて松山でのプローブパーソン調査結果への適用とその検証を行う。位置補正結果の検証には真値が必要だが、今回使用した調査での真値特定は困難であるため、マイクロ交通シミュレーションにより交通状況を再現し、それを真値とみなして、観測値、補正値をマップマッチングした結果と指標を基に比較を行うこととした。

(1) プローブパーソンデータ概要

プローブパーソンデータは、国土交通省、松山市が調査主体となり、平成19年10月から平成20年2月の5度にかけて実施されたプローブパーソン調査である。プローブパーソン調査はGPS機能付きの携帯電話を被験者が所持し、移動履歴を取得する形で実施されている。プローブパーソン調査のサンプル数はパーソントリップ調査と比較して少ないが、より詳細な分析が可能となっている。

本研究では位置データ取得間隔：5秒の総トリップ数30,145トリップのうち自動車トリップかつ松山都市圏で最も交通量の多い交差点である天山交差点（天山交差点を発着点としたものはのぞく）を経由した1,428トリップを対象として分析を行うこととした。

(2) 分析対象およびその指標について

今回対象とする交差点は、天山交差点のみとする。天山交差点の周辺図とネットワークの設定を示す。天山交差点は、国道33号（松山道の松山ICと接続）と松山環状線の交差点で松山では最も交通量が多い交差点のひとつである。特に朝ピークは南側からの流入で渋滞が発生している。分析結果について、交差点中心からの停止位置、停止時間を指標として整理するため、道路ネットワークを作成し、マップマッチングを行えるようにした。道路ネットワークは天山交差点を中心に東西方向（②-④）、南北方向（①-③）それぞれ200mの5ノード、4リンクとした。図4に停止位置と停車時間の関係図を示す。停止の判定については、速度が10km/h以下になった場合に停止と判断し、停止位置は10km/hで連続的に観測された（補正された）点の座標平均を計算し、その結果をマップマッチングすることで停止位置を決定した。さらに、停車時間は、停止位置での停止継続時間（最低停止時間は2秒）とした。

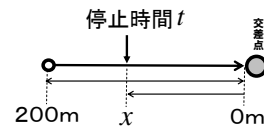


図3 停止位置と停車時間の関係図

(4) マイクロ交通シミュレーションの実行

天山交差点の南側からの流入を対象としてマイクロ交通シミュレーションを実行した。入力条件として、図4に天山交差点の南側流入部の状況を、図5に天山交差点

南側流入部の交差点形状を、表2に天山交差点南側流入部の信号現示を示す。交差点形状は右折レーンが2レーン、直進が1レーン、左折が1レーンの全4レーンである。信号現示は、2003年11月の松山交通量調査を用いた。左折可の青時間が直進の青時間より長くなっている。混雑時間帯であることを考慮して、右折時は右折青信号時のみ右折可能とした。

シミュレーションの対象時間帯は、平日の7:00～9:00までの2時間とした。時間帯別のOD交通量は、2003年11月の松山交通量調査を用いた。

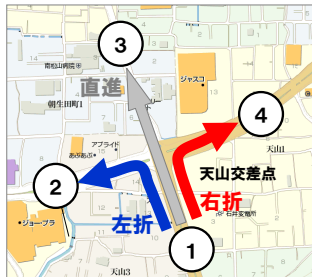


図4 天山交差点の南側流入部の状況



図5 天山交差点南側流入部の交差点形状

表2 天山交差点南側流入部の信号現示

	左折	直進	右折
1サイクル(秒)	150	150	150
1サイクルあたりの赤時間(秒)	50	90	133

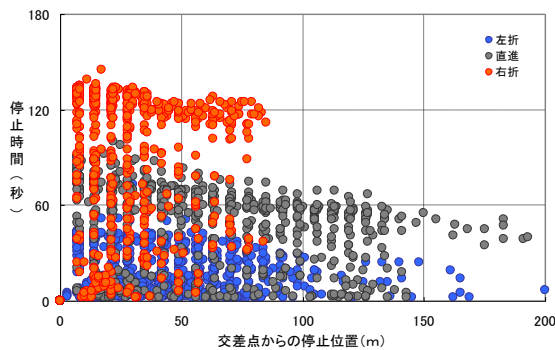


図6 経路別の停止位置と停止時間の関係(Sim結果)

(5) 検証結果

①マイクロ交通シミュレーション結果

図6に経路別の停止位置と停止時間の関係(Sim結果)を示す。停止時間は、左折と直進と右折で停止時間の最大値が異なっていることがわかった。これは、右折、左折専用レーンが設置されており、赤時間が異なるためと考えられる。つぎに、右折は青時間が短いため1サイクルあたりの捌け台数が少ないため、交差点の停止位置が前方に偏りがみられることがわかった。

②パーティクルフィルタにより補正した結果

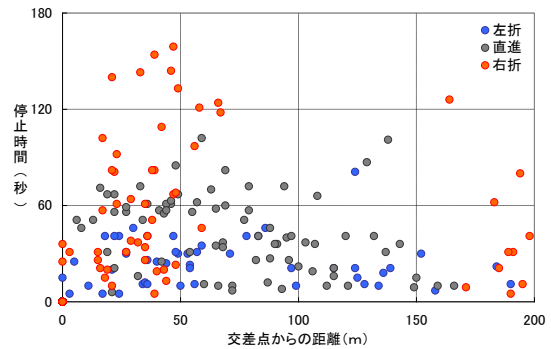


図7 経路別の停止位置と停車時間の関係(補正結果)

図7に経路別の停止位置と停車時間の関係(補正結果)を示す。右折車両については、交差点から60m付近までに集中していることがわかった。これにより右折レーンが少なくとも60mはあることが考えられる。それに対して、1度停止すると左折/直進と比較して停止時間が長いことから、青時間が短いもしくは、対抗直進車両による右折信号時のみということが考えられる。さらに、交差点からの距離が短い割に交通量が多いことから車線数が複数あることも考えられる。つぎに、左折と直進を比較すると直進の停止時間の方が比較的大きな値を示していることがわかった。左折と直進で青時間が異なり左折専用レーンが設置されていると考えられる。

以上で述べた考察は、経路別の停止位置と停止時間の関係が図6のシミュレーション結果と同様の傾向が見られており、交差点形状や信号赤時間の推定の可能性があると考えられる。

③シミュレーション結果と補正結果の比較

シミュレーション結果と補正結果の比較を行い、その考察について述べる。図8に信号赤時間の5%タイル値との比較を、図9に信号赤時間の10%タイル値との比較を示す。信号赤時間の5%タイル値の推定結果については、シミュレーション結果と補正結果でほぼ同じような値が得られた。信号赤時間の10%タイル値についても同様の結果が得られた。

補正の有無について、比較すると、右折時の結果が、補正なしに比べて補正ありの結果の方がシミュレーション結果と同様の値が得られた。

つぎに、区間別の停止時間の平均値について比較を行う。図10に直近0-50m区間の停止時間平均値を、図11に直近50-100m区間の停止時間平均値を示す。直近0-50m区間では左折時では、シミュレーション結果の方が小さい値となり、右折時には大きな値となった。直近50-100m区間では左折時ののぞき良好な結果が得られた。

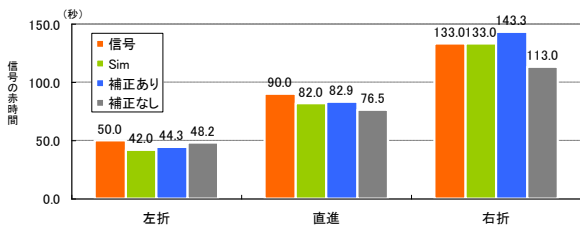


図8 信号赤時間の5%タイル値との比較

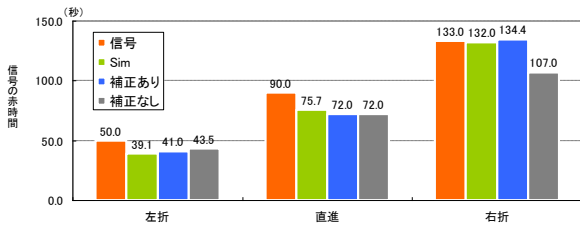


図9 信号赤時間の10%タイル値との比較

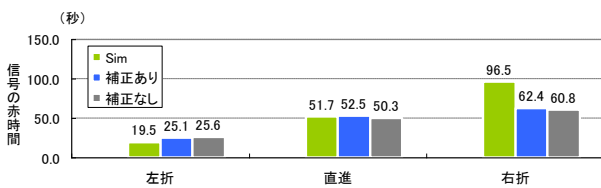


図10 直近0-50m区間の停止時間平均値

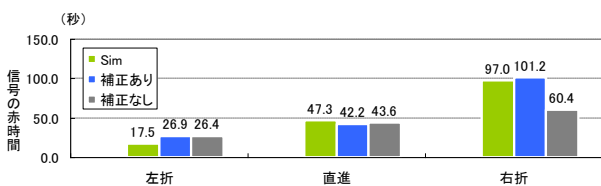


図11 直近50-100m区間の停止時間平均値

④シミュレーション結果の感度分析

表3に赤時間を増減によるマイクロシミュレーションの感度分析結果を示す。赤時間の平均値について比較をすると、混雑状況によって推定結果にばらつきが見られる。プローブパーソンデータを用いて、あらかじめ混雑時と非混雑時をセグメンテーションした上でパラメータ推定する必要があると考えられる。

表3 赤時間を増減によるマイクロシミュレーションの感度分析結果

赤時間	左折		直進		右折	
	5秒増	5秒減	10秒増	10秒減	5秒増	5秒減
サンプル数	1163	1215	1225	1221	758	774
1サイクル(秒)	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
1サイクルあたりの赤時間(秒)	55.0	50.0	45.0	40.0	95.0	90.0
赤時間の5%タイル値(秒)	49.0	42.0	33.0	29.0	96.0	82.0
赤時間の10%タイル値(秒)	44.0	39.1	31.0	27.0	93.0	75.7
青時間比	63.3%	66.7%	70.0%	73.3%	36.7%	40.0%
直近200m区間の通過台数の割合	21.5%	39.1%	50.1%	55.0%	7.1%	11.6%
直近0-50m区間の赤時間平均値	19.4	19.5	15.6	14.0	44.6	51.7
直近50-100m区間の赤時間平均値	25.0	17.5	12.9	11.9	50.6	47.3
直近100-150m区間の赤時間平均値	28.6	13.4	3.5	5.5	48.8	37.9
直近0-50m区間の赤時間標準偏差	15.5	14.5	11.6	9.6	37.2	28.8
直近50-100m区間の赤時間標準偏差	19.4	11.4	9.0	8.4	32.9	21.0
直近100-150m区間の赤時間標準偏差	17.1	7.7	0.5	3.5	30.2	20.9

4. おわりに

プローブパーソンデータから停車位置、停車時間を指標として、マイクロシミュレーション結果との比較により交差点形状や信号赤時間の推定が比較的容易であることを示した。しかし、パーティクルフィルタによる位置精度の向上については今回の発表ではその有効性を明確に示すことはできなかった。

今後の課題として、マイクロシミュレーションによる取得間隔と誤差の大小による精度検証を行いたい。さらに、平面座標データの分解能に応じて、何ができるのかを検討した上で、歩行者軌跡データへのパーティクルフィルタの適用を行っていきたいと考えている。

謝辞：なお本研究を実施するにあたって文部科学省科研費基盤A「プローブ技術を援用したデータフュージョン理論による総合的交通行動調査の高度化（代表：羽藤英二）」の協力を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Michael Isard, Andrew Blake : Condensation-conditional density propagation for visual tracking, International Journal of Computer Vision, Vol. 29, No. 1, pp. 5-28, 1998.
- 2) 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.
- 3) 薄井智貴, 三輪富生, 山本俊行, 森川高行 : 歩行者プローブデータ多面的活用のためのデータクリーニング手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, vol. 39, CD-ROM, 2009.