

# 集計位置データからの人流のリアルタイム推定のための粒子フィルタの提案と東日本大震災への応用

須藤 明人<sup>1</sup> 檜山 武浩<sup>1</sup> 矢部 貴大<sup>1</sup> 金杉 洋<sup>1</sup> Xuan Song<sup>1</sup> 樋口 知之<sup>2</sup> 中野 慎也<sup>2</sup>  
斎藤 正也<sup>2</sup> 関本 義秀<sup>1</sup>

**概要:** 大災害直後の都市の人流を予測できれば、救援隊の配備や物資の支援などの計画策定に貢献することができる。しかし、大災害直後の人の動きは日常的な行動とは大きく異なるため、過去のデータに基づいた推定では限界があり、リアルタイムなデータの活用が望まれる。これまではプライバシー保護の観点からリアルタイムデータの活用が難しかったが、政府の強い後押しもあってエリアごとの集計データのリアルタイム活用が可能になってきた。本発表では、リアルタイムなデータと交通シミュレーションのデータ同化手法による災害直後の人流推定手法の結果と、事後のアンケート調査を比較によって、リアルタイムデータによる推定の性能を評価した結果を報告する。

## Particle Filter for Real-time Human Mobility Estimation with Aggregated Location Data with Application to Great East Japan Earthquake

Akihiro Sudo<sup>1</sup> Takehiro Kashiya<sup>1</sup> Takahiro Yabe<sup>1</sup> Hiroshi Kanasugi<sup>1</sup> Xuan Song<sup>1</sup>  
Tomoyuki Higuchi<sup>2</sup> Shinya Nakano<sup>2</sup> Masaya Saito<sup>2</sup> Yoshihide Sekimoto<sup>1</sup>

### 1. 概要

都市における人流のリアルタイムな推定は、マーケティングといった民間企業での活用に加え、交通政策や災害時の救助にも貢献できる幅広い応用が見込まれる研究である。例えば、災害が発生した直後から、被災者の位置をリアルタイムに推定できれば、逃げ遅れている人や危険なエリアに留まっている人々を防災の担当部署が把握することで損害を軽減できると考えられる。東日本大震災の津波被害において、当局が逃げ遅れ等を把握できていれば被害が軽減できていた可能性があり、30年以内に70%の確率で発生するといわれている首都直下地震では、死因の第一位が火災によるものと見積もられており、人の分布と火災の状況と突き合わせて危険な状況にある人々を発見することで、死傷者を減らせる可能性がある。ただし災害が発生すると行動パターンが過去と大きく変わる可能性があるため、災害時

のリアルタイムな人流の推定は過去の位置情報だけでは推定が難しい。しかし、リアルタイムな位置情報の利用は主にプライバシー保護の観点から活用が進んでいなかった。

一方で、政府の強い後押しもあって位置情報のリアルタイムな活用が今後進展する見込みである。2015年度末までに構築される予定のG空間プラットフォームにおいて、リアルタイムな位置情報の活用が想定されている。また、ゼンリンデータコムといった一部の企業からは、プライバシー保護に十分留意した形式でのリアルタイムデータの提供が始まった。ただし、これらのデータはプライバシー保護のため匿名化されている。匿名化処理の一般的な形式の一つが、エリアと時間で集計処理されたデータである。

このリアルタイムデータを用いて人流推定する問題は、人の位置を状態ベクトルとする状態空間モデルで表現でき、原理的には粒子フィルタによって個々人の時々刻々の位置の推定が可能である。しかし、状態ベクトルが高次元であり、集計処理された観測データと状態ベクトルの関係が非線形であることから、標準的な粒子フィルタでは高精

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>2</sup> 統計数理研究所

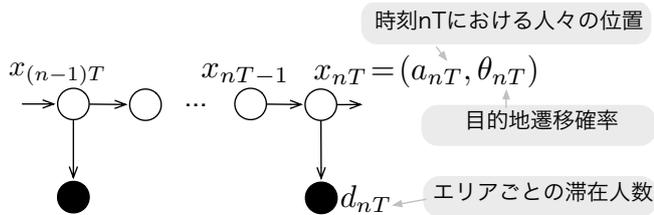


図 1 グラフィカルモデルによる問題の表現.  $x_t$  は状態ベクトル,  $a_t$  は時刻  $t$  での人々の位置,  $\theta_t$  は  $t$  での目的地遷移確率,  $d_t$  はエリアごとの滞在人数.  $nT$  ごとに  $d_t$  が観測値として与えられる。

度な推定が難しかった。須藤らは、粒子フィルタの提案分布を工夫することで標準的な粒子フィルタよりも高精度に推定が行えることを示した [1]。本報告では、この手法を東日本大震災が発生した当日の東京都に適用し、過去のアンケート調査と一貫した結果が得られることを示す。

本発表の新規性は、[1] で提案された手法を実際の東日本大震災直後の東京都の人の流動予測に適用し、事後のアンケート調査で得られた行動パターンとの比較を試みた点にある。

## 2. 手法

本発表で人の位置の推定に用いられる手法は、須藤らの提案した粒子フィルタ [1] である。ここでは手法の概要を述べるにとどめ、詳細は [1] を参照されたい。

リアルタイムに得られる位置データを用いて、時々刻々の人の位置を推定する問題は、図 1 のような状態空間モデルにおける状態ベクトルの推定問題として定式化できる。状態ベクトルの時間発展を与える予測モデルと、観測過程のモデルである観測モデルを定めれば、原理的には粒子フィルタによって状態ベクトルの推定が可能である。本手法では、予測モデルとして災害時の行動モデルに基づく都市人流シミュレーターを用い、観測モデルとして携帯電話キャリアの取得する生 GPS データから匿名化された集計データの生成過程のモデルを用いる。残念ながら、行動モデルの不十分さと推定したい状態空間が高次元であることから、素朴な粒子フィルタでは十分な精度を得ることができない。

そこで、高次元な問題には粒子の状態ベクトルの時間発展を与える提案分布の工夫が有効であるという示唆 [4] をふまえ、過去の粒子の状態だけでなく得られた観測値も用いる提案分布を用いる。素朴な粒子フィルタでは、予測モデルが粒子の時間発展を与える。しかし、予測モデルの予測力があまり高くなく、しかも探索空間が高次元であると、ほとんどの粒子の尤度が低くなってしまい、粒子のアンサンブルによる事後分布の近似精度が悪化してしまう。そこで、本手法では観測値が与える尤度の高い部分を重点的にサンプルできるような提案分布を用いる。具体的には、予



図 2 推定対象エリアと主要道路. 対象エリアの広さは約  $65.5 \text{ km}^2$  である。

測モデルの与える状態に、ナッジング項と呼ばれる観測値に近づく効果を持つ項を加えたものを粒子の時間発展として採用する。

この提案分布が与える時間発展は

$$(a_{nT}^i, \hat{D}) = \underset{(a, D)}{\operatorname{argmin}} [d(a_{nT}^i, a) + \hat{d}(a, D)] \text{ s.t. } \varphi(D) = d_{nT} \quad (1)$$

という最適化問題の解  $a_{nT}^i$  で与えられる。ここで、 $\hat{d}$  は人々の配置を表すベクトルの距離、 $\varphi(D)$  は人々の配置  $D$  を集計して得られる小エリアごとの滞在人数のベクトル、 $s_{nT}^i$  はシミュレーションの結果、 $d_{nT}$  は観測データである。この最適化問題は分布間の距離としてしばしば用いられる EMD の求値問題に帰着するので、[5] で提案された解法によって解を求めることができる。

## 3. 実験

図 2 のエリアを対象に、東日本大震災当日の GPS データを用いて人流の推定を行った。推定を行ったのは 14:00 から 24:00 までである。GPS データには、228,068 人分のデータが含まれ、合わせて 5,569,663 レコードが記録されていた。この GPS データを集計して作成した分布データを 1 時間毎に観測データとして与えた。道路ネットワークデータには日本デジタル道路地図協会が作成したデータを用いた。モデルのパラメータは [1] で用いられている値を用いた。

比較したアンケート調査は伊藤らによる調査 [6] と政府による調査 [7] である。伊藤らは、震災当日の首都圏からの帰宅立ち寄り行動について web アンケート調査を行い、978 人から得られた回答を報告している。また、政府による調査では、震災発生時に会社や学校にいた人を対象に、会社・学校を離れた時間を 3072 人の回答者に尋ねた。

表 1 が、震災当日の目的地や立ち寄った場所について、アンケート調査と、本手法での推定結果を比較した結果である。震災当日に自宅に向かった人は、政府調査では 84.1%であったのに対し、提案手法では 76.8%であった。駅に向かった人と小売店に行った人は、伊藤らの調査結果

	Go Home	Station	Store
提案手法	76.8%	73.3%	19.3%
伊藤らの調査 [6]	-	62.2%	31.3%
政府調査 [3]	84.1%	-	-
誤差	-7.3 pt	11.1 pt	-12.0 pt

表 1 東日本大震災当日の東京での人々の立ち寄り行動.

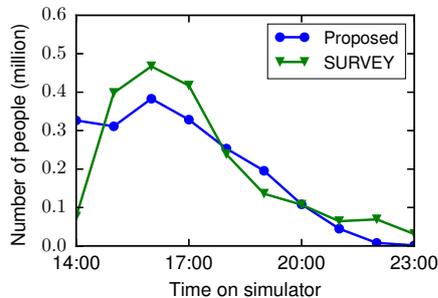


図 3 東日本大震災当日の時刻ごとの帰宅開始人数.SURVEY は政府が行ったアンケート調査結果をもとに算出.

ではそれぞれ 62.2%、31.3%であったのに対し、提案手法ではそれぞれ 73.3%、19.3%であった。アンケート調査とは概ね 10 ポイント前後の誤差となり、「過半数が自宅・駅に向かい、数割の人が小売店にいった」という定性的な行動の傾向をつかむことができています。

図 3 は、1 時間毎の帰宅行動を開始した人数を比較した結果である。東京では、通常の平日は 19 時ごろが帰宅のピークであるのだが、アンケート調査によると東日本大震災当日は発災の数時間後にピークがある。提案手法は、ピーク時間が発災の数時間後に現れることを再現することができた。また、各時刻の帰宅開始人数も、アンケート調査と近い結果を得ることができた。

#### 4. 結論

災害救助支援をはじめ幅広い応用が見込まれる、都市における人流のリアルタイムな推定について、[1]で提案された手法を東日本大震災当日の東京都に適用し、過去のアンケート調査で得られた人々の行動パターンと一貫性のある推定結果を得ることができた。

#### 参考文献

- [1] Akihito Sudo, Takehiro Kashiya, Takahiro Yabe, Hiroshi Kanasugi, and Yoshihide Sekimoto, “Human Mobility Estimation Following Massive Disaster Using Filtering Approach”, Journal of Disaster Research, 2016.
- [2] 伊藤ら, “首都圏における震災帰宅立ち寄り行動の実証研究”, 都市計画, 2013.
- [3] 首都直下地震帰宅困難者対策協議会, “首都直下地震帰宅困難者等対策協議会 最終報告”, 2012.
- [4] Chris Snyder, Thomas Bengtsson, Peter Bickel, and Jeff Anderson. 2008. Obstacles to high-dimensional particle filtering. Monthly Weather Review 136, 12 (2008), 4629-4640.
- [5] Yossi Rubner, Carlo Tomasi, and Leonidas J Guibas. 2000. The earth mover’s distance as a metric for image retrieval. International journal of computer vision 40,

- 2 (2000), 991-21.
- [6] 伊藤香織, 青野貞康, and 大森宣暁. “首都圏における震災時帰宅立ち寄り行動の実証研究.” 都市計画論文集 48.3 (2013): 873-878.
- [7] 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会. “首都直下地震帰宅困難者等対策協議会 最終報告参考資料”, 2012.