

# 論文の内容の要旨

論文題目 データ同化手法を用いた人の流れの高精度推定手法の研究

氏名 中村 敏和

近年、観測技術や情報処理技術の発展により、人の流れをマイクロに把握し、分析することが可能になってきており、建物内部の動線設計や、防犯対策、混雑の解消、地震や火災発生あるいは大規模イベント開催における混乱に伴う二次的災害予測などへの活用が期待される。

一方で、コストやメンテナンスの点から、常時全てを観測し続けることは困難である。そのため、得られたデータや観測地点の形状などを用いて、シミュレーションモデルを構築し、人の流れを推定していく必要がある。しかし、人の流れのような非線形な事象では、その振る舞いを完全にモデルに組み込むことは難しく、予期せぬ事態により推定結果と実際とでずれが生じる可能性が高いと考えられる。

そこで、本研究では、シミュレーションモデルによる推定値を、データ同化手法によって観測値で補正し、駅構内や東京都市圏などでの人の流れを高精度に推定する手法を提案することを目指す。さらに、シミュレーションモデルの精度と最終的な精度の関係性や、同化する観測値の情報量と最終的な精度の関係性を分析し、より実用性の高い提案を行う事を目指す。

観測値とシミュレーションモデルを融合して精度向上を目指す研究は他にもいくつかあるが、本研究と他の研究との違いとして、求める対象が移動軌跡の確率分布であり、これは非連続で離散的で分散も計算できない変数の確率分布である点が挙げられる。こうした対象に対してデータ同化手法を用いた推定手法を提案している研究はまだなく、新規性が高いと言える。交通量などの数値だけでなく一人一人の移動軌跡を推定する事で、マーケティングや防犯、イベント開催時の対応など、人の属性が重要になる事柄に対し、より効果の高い情報を提供できる。また、これにより確率的シミュレーションモデルであればその構造を限定せずに適用できる手法の提案をすることも独自性のひとつである。

論文構成について簡単に述べる。第二章では、計測技術・手法とシミュレーションモデル、観測値とシミュレーションモデルの融合に関する既往の研究事例について触れ、本研究の独自性について述べる。第三章では、本研究で提案する人の流れ推定手法のフレームワークについて述べ、方法論的位置づけおよび理論的裏付けについて述べる。そして、第四、五章で小規模空間と大規模空間に分けて、それぞれの人の流れ推定への適用について述べる。小規模空間として駅構内での人の流れの推定を行い、大規模空間としては東京都市圏の人の流れの推定を行う。最後に第六章で、本論文の結論として、研究成果と今後の課題について述べる。

第二章では、関連する技術や既往研究について触れた。観測方法として、カメラ・レーザスキャナを用いた人物追跡、GPSを用いた非集計観測、ICカードやETCを用いた観測、PT調査などのアンケート調査について触れた。これらの技術は多くの研究により発展してきているが、全てを計測するのは難しい。そこで、計測できない部分を推定するために、シミュレーションモデルの研究も多く行われて来ている。主に、選択行動モデル、流体モデル、離散モデル、セルオートマ

トンモデル、経路選択モデルに分けて、既往研究に触れた。これらの研究によりある程度推定することができるようになっているが、人の移動の多様性からモデルで全てを表現することが困難なこと、パラメータの同定が難しいことなど、課題も多く残っている。そのため、観測値でシミュレーションモデルを補正する研究もいくつか行われてきている。集計観測値でモデルのパラメータを補正する研究や、データ同化手法を用いて道路の交通量や速度を推定する研究が行われている。これらを踏まえ、本研究の独自性について整理した。

第三章では、データ同化手法について触れ、本研究で用いるパーティクルフィルタ法と最適内挿法について詳しく紹介し、その適用方法について述べた。データ同化手法とは、モデルに観測値を与え、その再現性を高めるための手法である。モデルによって推定値の候補群を生成し、候補群から観測値に最も適する候補を選び、最終的な推定値とすることで、モデルによる推定値と観測値の同化を行う。モデルと観測値の誤差をフィルタリングする手法として、直接挿入する手法、ナッジング、最適内挿法や3次元変分法などの3次元データ同化、カルマンフィルタ、アンサンブルカルマンフィルタ、パーティクルフィルタなどの逐次4次元データ同化、4次元変分法などの4次元データ同化が提案されてきた。本研究では、離散的な変数（移動軌跡）の確率分布を求めるために、パーティクルフィルタ法を用い、確率分布をサンプリング集合で近似し、各サンプルの確率を最適内挿法で観測値から補正する手法を提案した。

パーティクルフィルタ法は状態遷移モデルと観測モデルの2つの段階から成っている。本研究では、状態遷移モデルとして、シミュレーションモデルから移動軌跡候補を生成する操作を当てはめ、観測モデルとして、移動軌跡候補が観測された場合にその重みを合計するという操作を当てはめる。パーティクルフィルタ法では、状態遷移モデルで求められる移動軌跡の確率分布予測と、観測モデルで計算できる観測値の推定と実際の観測値によるずれを考慮することで、各パーティクルの重み付けを行う。

重みの更新には最適内挿法を用いる。最適内挿法では、ベイズの定理から移動軌跡の確率分布として尤もらしいものを計算することで重み付けを行う。本研究では、一般的な最適内挿法に各人の重みの合計が1になるという制約を加えて解を求める方法を示した。また、こうして厳密に計算する手法は計算コストが  $O((人数 \times \text{パーティクル数})^2)$  になってしまうため、近似計算する方法についても提案した。

本研究では、提案手法を、駅構内などの小規模空間と都市圏での大規模空間に適用し、実験した。小規模空間では、厳密な計算を行い、提案手法の効果を検証し、さらに、パーティクルフィルタ法による予測値の改善と近似計算の精度、計算時間の比較を行った。大規模空間では、近似計算を用い、シミュレーションモデルと精度の関係や、観測地点数と精度の関係、観測地点の評価を行った。

第四章では、大崎駅構内を対象にした適用実験について述べた。本研究では、ポテンシャルマップ法を拡張した経路選択モデルをシミュレーションモデルとして構築し、それを用いて実験を行った。ポテンシャルマップ法では、任意の点から目的地までの移動コストを算出し、移動コストのポテンシャル面を描く。次にこのポテンシャル面に対して勾配の急な方向に向かって歩行者を移動させ、経路を生成する。しかし、最も急な方向に向かって移動すると複数の候補を生成できなく、本研究では移動軌跡の確率分布を求めるのが目的なので、ポテンシャルマップ法を拡張し、各地点のポテンシャルから確率的に移動方向を決定するモデルを提案した。

小規模空間での検証として、大崎駅構内でレーザスキャナセンサを用いて取得された人の流れの観測データを用いる。60m×20mほどの広さの駅構内で、改札口や階段、トイレなど11の出入口が存在する。7:00～7:05までのデータを用いて、提案するデータ同化手法について検証する。

観測値として、各出入口からエリアを出る人の数を 30 秒間隔で得られたと仮定して検証を行ったところ、提案するデータ同化手法を用いることで、推定精度を向上させることに成功した。また、OD 表を比較したところ、シミュレーションモデルのみでの推定値よりも提案手法による推定値の方が、50%以上精度が高かった。さらに、パーティクルフィルタ方のフィルタリングによる予測精度も若干ではあるが改善されていることも確認した。最後に、厳密な計算と近似計算を比較することで、近似計算で十分な精度を確保できていること、パーティクル数 100 個の場合で、計算時間が約 1/1000 になっていることが分かった。

第五章では、東京都市圏での人の流れの推定実験を行った。大規模空間への適用として、近似計算を用いて重みを更新した。東京都市圏のような広範囲な領域を対象とするシミュレーションモデルとして、行動パターンを実データから生成して用いるデータ指向なモデルと、NL モデル (Nested Logit モデル) を用いた選択行動モデルを構築し、適用した。NL モデルは、目的と目的地を NL モデルで記述したモデル、目的と目的地だけでなく交通手段も含めた NL モデルを用いたモデルの 2 つを用意した。

東京都市圏の人の流れの全体を実際に計測することは難しいため、本研究では提案する手法の検証を行うために、PT 調査データを全体の真値とするような仮想都市圏を想定した。そして、その仮想都市圏からサンプル率 3%の仮想 PT データを作成し、観測値も仮想都市圏で計算して実験環境を用意した。データ同化に用いる集計の観測データとして、東京都市圏の鉄道駅における 1 時間ごとの乗降客数と、道路交通センサスの観測地点における 1 時間あたりの交通量を得ることができると仮定して用いた。

データ指向なモデルでも、シミュレーションモデルのみの推定値よりも提案手法を用いることで精度向上した。NL モデルを用いるとさらに精度が向上した。また、パーティクル数や観測地点についての検討も行い、パーティクル数は 100 個程度あれば十分であり、観測地点数は 6 割程度あれば十分であることを示した。これらは、計算量が重要となる都市圏などの広範囲な領域で推定する時に有用な知見となる。また、観測値の情報量を求める式を導入し、観測地点の平均情報量と精度の関係を分析し、多様な動線の集まる観測地点での観測値の効果が高いことを示した。