

論文の内容の要旨

論文題目 メッシュ人口データを用いた人口動態の変化検出に向けた
潜在状態推定
(Latent State Estimation for Change Detection in Human
Dynamics Using Mesh Population Data)

氏 名 神谷 啓太

都市における人々の移動や人口分布の時系列的な振る舞いの把握、すなわち人口動態の把握は多岐にわたる分野において重要である。従前より、人口動態を把握するためには、アンケート調査型の国勢調査やパーソントリップ調査、ならびに定点観測型の交通量調査やトラフィックカウンターによって人口動態を推計するという方法が取られてきた。近年ではさらに GPS 軌跡データや交通系 IC カードデータ、携帯電話通信情報など多様なデータが取得されるようになってきた。このデータ取得の広がりを受け、人口動態の把握に関する研究が盛んに行われている。ここでいう人口動態を把握することとは、都市内における OD フローや人口分布の代表的なパターンなど、対象空間における人の流れや滞在に関して理解することである。そのため、大量に存在するデータをいかに解釈可能な形に縮約するか、すなわちデータの要約や可視化に研究の軸が置かれてきた。人口動態の把握を通じた分析結果は、都市計画への活用や災害シミュレーションのシナリオ策定に用いられているほか、エリアマーケティングへの利用やインフルエンザや感染症の流行予測などへの応用もされている。

ただし人口動態は日々変動するものであり、しかもそのダイナミクスは定常的であるとは限らない。人の移動が有する不確実性だけでなく、災害やイベントの発生など非日常時における局所的な変化や、都市構造や人口構造の変化に基づく人口動態のトレンド変遷など、人口動態自体のダイナミクスの変化というものも存在する。そのため前述した対象空間全体の人口動態のデータ要約だけでなく、人口動態のダイナミクスの変化をより詳細な空間で把握することが、より高度な交通サービスに資すると考えられる。ただし、上述した複雑なダイナミクスの複雑性により、見かけ上は人口動態に変化が存在しても、それは日常的な変動である場合や、逆に、見かけ上では変化が無くとも、その背後では変化や異

常が生じている場合もあると考えられる。そのため、これらの変化は単にデータの大小や増減によって把握できるものではない。したがって、より詳細な空間に着目した上で、該当する空間周辺の人口動態や時系列の振る舞いを考慮し、人口動態の観測データから直接測ることのできないデータの構造やデータ生成に影響を及ぼす状態を推定することとなる。すなわち、潜在状態の推定問題として手法を構築する必要があり、既往研究はいまだ限定的である。

また、これまでの人口動態の状態把握の取り組みでは、主に非集計データを用いた分析が行われてきた。そのため、個々人のトリップや移動情報を保持したまま分析が行える一方で、プライバシー保護の観点からデータ取得や公開に制限がかかりやすい問題がある。従って、単位空間で集計化された入手可能性の高いデータで前述の人口動態の状態推定を行えることが望ましい。

以上の背景の下、本論文はメッシュ人口データを用いて、人口動態の変化検出に向けた潜在的な状態推定を行うことを目的とする。まず、状態推定手法の整理および基本モデルの検証を行い、モデルの拡張方針についてまとめる。この拡張方針に基づいて潜在状態の推定を通じた変化検出手法を構築し、その有効性を検証する。そして人口動態の変化検出手法の発展性に関する議論を行う。

ここで、人口動態の潜在的な状態推定とそれに基づく変化検出がもたらす可能性について、交通サービスに関して説明する。本研究は、人口動態の観測データの背後には潜在的なデータ構造や状態が存在するという立場に立っており、状態推定手法を通じてその分析を目指す。この潜在状態に着目した変化検出結果を新たな指標の一つとして交通サービスに組み込むことにより、より良いサービス設計に有用であると考えられる。例えば、ある日の人口動態に対して検知された異常状態が時間と共に拡散・遷移する様子を分析することができれば、その異常発生の原因究明やサービス改善のための評価が可能となる。短期的な視点では、開催されたイベントがもたらした人口動態や人の動きへのインパクトの評価、そして長期的な視点では、交通インフラの新設が人口動態に及ぼした影響の把握などである。そして、潜在状態の解釈を加えることで、そのインパクトとは何だったのか、どのような潜在的ニーズの変化に対して交通サービスを改善する必要があるのかなど、評価や意思決定に対してより有用な指標になると考える。このように人口動態の潜在的な状態推定はより高度な交通サービスに資するものであると考える。

本論文は全6章で構成される。各章の内容の要約を以下に記す。

第1章（序論）では、本研究の背景と目的を述べる。まず、近年盛んに行われている人口動態把握に関する既往研究を概観し、人口動態の変化検出のためには潜在的な状態に着目することが重要であることを述べる。また、人口動態把握に用いられるデータの多様性に

についても触れ、入手可能性の高いデータを用いた分析の有用性を述べる。以上を踏まえ、本研究ではメッシュ人口分布データを用いて、詳細な空間に着目した人口動態変化検出に向けた、潜在的な状態推定を行うことを目的とする。

第2章（既往研究の整理）では、状態推定問題を対象とする既往研究を整理する。まず、分野横断的に状態推定手法のレビューを実施し、各手法の持つ特性について述べる。次に、人口動態を対象とした既往研究を整理する。それぞれの取り組みの中で人口動態の状態がどのように定義・分析されているかを説明する。また、前章で行ったデータの整理結果を踏まえ、各既往研究内で使用されているデータと分析内容との関係を整理する。

第3章（潜在状態推定手法の基本フレームワーク）では、潜在状態推定の基本フレームワークとなる状態空間モデルについて述べる。状態空間モデルはデータ同化の文脈で頻繁に使われているモデルであり、観測データとシミュレーションを統合することが可能である。しかし、人口動態分析における潜在状態の時系列遷移を記述するシステムモデルに制約があることなど、本論文で扱う問題にデータ同化を適用することには課題がある。これを、データ同化手法の適用を通じて示す。そこで、既存シミュレーションモデルによらないデータ指向な方法として、状態変数に離散値をとる隠れマルコフモデルの適用を考える。東京23区のメッシュ人口の潜在状態の推定と視覚化の検証を通じ、状態数を事前に設定する必要があること、および推定される潜在状態の解釈が困難であることが変化検出に向けた課題であることを示す。これらの議論を踏まえた上で、人口動態の状態推定に向けたモデル拡張方針について述べる。

第4章（隠れマルコフモデルによる変化検出）では、第3章で議論したモデル拡張方針に従い、階層ベイズ法の導入および事前分布の共有化によるモデルを構築する。また、そのモデルをメッシュ人口に対する変化検出問題へと適用する。変化検出においては、学習用メッシュ人口時系列から潜在状態およびモデルパラメータを学習し、そのモデルを用いて検証用メッシュ人口時系列の潜在状態を推定した上で変化スコアを算出する手法を開発している。そしてシミュレーションデータへの適用を通じ、提案手法の精度検証を実施する。また、実データに対する適用では、列車運休がもたらした短期的な人口動態の異常な振る舞いと、中長期的な人口動態の変化の検出を実施する。適用結果の考察を通じて、提案手法の有効性を実証するとともに、その課題について議論する。

第5章（トピックモデルによる変化検出）では、メッシュ人口データに含まれる居住地などの属性データを利用し、推定される潜在状態および検出される変化内容の意味解釈を試みる。そこで自然言語の分野でよく用いられるトピックモデルによるアプローチを導入する。潜在状態数の事前設定の問題を解消するため、階層ベイズ法を導入したトピックモデルとしてモデルの構築を行い、人口動態の潜在状態推定を行う。人口動態をトピックモデルとして捉えるため、各時刻における各メッシュを一つの文書、そのメッシュ内に存在する滞在者の居住地を一つの単語、「ある地域からの来訪者が潜在的に多い」などといった潜在的な構造としての人口特性をトピックして扱う。実データに対する適用を通じ、推定さ

れた潜在状態の意味解釈の有効性、およびメッシュ毎の潜在状態の把握の有効性について分析・考察する。さらに、メッシュ毎に推定されたトピック分布の経年変化に基づく変化検出手法を構築する。提案手法を実データへ適用し、人口動態の構成に変化が起きたと考えられる地域の検出と、その変化内容の分析を行う。そして上述した隠れマルコフモデルに基づく手法とトピックモデルに基づく手法の特徴について比較し、人口動態の変化検出手法の更なる発展性について議論・整理する。

最後に、第6章（結論）で本論文の成果をとりまとめ、今後の課題および展望について示す。

本論文では、メッシュ人口データを用いて、人口動態の変化検出に向けた潜在状態の推定を実施した。隠れマルコフモデルに階層ベイズ法を導入し、事前分布の共有化を施したモデルに基づく変化検出手法を開発した。提案手法の適用を通して、電車運行停止に起因したメッシュ人口値の異常状態の検知や、人口動態の経年変化の検出などに対して、提案手法が有効であることを確認した。また、推定した潜在状態および検出した変化に対して、トピックモデルに基づく潜在的意味解釈を行い、提案手法が詳細な移動情報を基にした人口動態の構造把握に資することを確認した。

なお、提案手法における人口動態の状態推定手法は、メッシュ人口データ以外のデータに対しても適用することのできる汎用的なものである。また、単位空間にメッシュ以外を設定することも容易である。そのため、提案手法を用いることで任意のデータセットに対して任意の単位空間を設定した分析を行うことが可能となる。さらに、状態空間モデルを利用する提案手法を基盤に、複数の観測データを統合するモデルへと拡張することが可能である。本研究で行った変化検出や潜在的意味解釈のアプローチを実施することで、移動に関する社会メカニズムの解明に貢献することが期待される。