

論文の内容の要旨

論文題目 Urban human mobility analysis for urban system design
based on public transportation smart card data
(交通ICカードデータに基づく都市システムデザインのため
の人間の都市内移動分析)

氏 名 前田 高志ニコラス

都市とは、場所と場所が人・モノ・情報を媒介にして互いに複雑に相互作用する“システム”である。都市の発展はそのようなフィードバックループによる成長として特徴付けることができる。一方、そのようなボトムアップの都市の自己組織化に対して、トップダウンの都市計画が、都市計画者の想定した通りの効果を生まないどころか、場合によっては思わぬ悪化を招くこともある。例えば、都市のスプロール現象・交通渋滞・土地価格上昇・犯罪・大気汚染・労働の過剰供給などはこれまでも大きな都市問題であった。近年は新興国における急激な都市化・人口増大や、先進国における人口減少などにより、このような複雑な都市問題が発生しやすく、対処はさらに難しいものとなっている。

これに対して、近年、都市のデータを大量に取得することが可能になってきており、それらのデータを用いた都市のモニタリングについて、国連や世界銀行なども注目をしている。これらのデータには、電話通話履歴データ、夜間光データ、ソーシャル・メディア・データなどがあるが、とりわけ重要なのは人の移動データである。人の移動データは、携帯電話のGPSや、交通ICカードによって、自動的に収集されている。人の移動は都市における地域間の「流れ」を示している。これは都市を相互作用から捉えるシステム理論のモデリングに有用である。

現在の都市をめぐる状況は、都市内の各地域が激しい変化をするため、その理解や予測が難しい一方、地域間の流れについての情報は容易に得られるようになってきているのである。

本博士論文は都市内の各地域の状態を、地域間を流れる人の移動との関連によってモデル化し、人の移動データから各地域の状態を理解・予測する手法を提案することにあ

る。具体的には、下記の3点についてのモデリング・推測手法の提案を行う。

1. 都市内の各場所の現在の状態を、人の移動情報から推測する手法。ここでは、「現在の状態」として、都市活動（ショッピング・労働など）を推測する。
2. 都市内の各場所の一年後の状態を、人の移動情報から予測する手法。ここでは、「一年後の状態」として、転入者数を予測する。
3. 都市内におけるサブシステムを把握する。ここでサブシステムとは、都市内において同じような機能を同じような場所に対して果たしている場所の集合である。

例えば、似たような目的地に訪れる人の多い住宅地は一つのサブシステムである。

本研究では、上記手法の構築を行うと同時に、その手法の妥当性を関西地方の交通ICカードを用いて、検証を行う。

本論文の第1章では本研究の背景・目的を説明する。第2章では関連研究の紹介を行う。第3章では、本研究のフレームワークの定義を行う。第4章では本研究で用いるデータの説明を行う。第5・6・7章では本研究の研究結果を示す。第8章では日本を例に本手法の都市計画における具体的な応用法を示す。第9章は結論を導く。

第5章の研究は、人の移動データのみから、各場所においてどのような都市活動がなされているかを推定する。これまで、ある土地が住宅地なのか、商業地なのか、といった風にその土地の利用目的を離散的に推定する手法があった。しかし、これでは住宅地と商業地の混合している土地の都市活動を理解できない。このため、ある地域にどのような目的で人が訪れたかを推定する手法を検討する。

各駅・各日の降車客数の時間的変化をグラフにすると、ビジネスエリアであれば朝8時付近に急激な山が現れる。一方、住宅地では午後6時付近をピークとした緩やかな山が現れる。ビジネスエリアでもあり住宅地でもあるような土地では、これらが重なったようなグラフになる。このため、各駅・各日の降車客数の時間分布は有限個の基本分布の重ね合わせで表現できると考える。ひとつひとつの基本分布は出勤や帰宅などの目的に対応すると考えられる。このように仮定した上で、各駅・各日の降車客数の目的別の内訳を推定する。

本手法の結果はパーソントリップデータとの比較において、高い相関を得ることができた。また、この手法を用いて、各駅の都市活動の変化検知を行い、ショッピングモール開業などによる都市活動の急激な変化の検知を行うことができた。

第6章では、人の移動データから、将来の各地への引越し者数を予測する。本研究では、住宅地の周辺が便利であれば、休日に遠くへ出かける必要がなく、そのような場所には将来多くの人々が引っ越してくるという仮説をおく。ここで、トラベル・コスト法という「移動時間の機会費用」と「目的地の便益」の両者を求めることができる既存の手

法を拡張する。「移動時間の機会費用」とは、「移動をしなかった場合に得られたはずの効用」を意味し、これは住宅地周辺の便利さに比例すると考えられる。既存の手法では、「移動時間の機会費用」と「目的地の便益」はそれぞれ1変数であったが、それらを出発地ごと、目的地ごとの複数の変数を仮定して、それらの変数をベイズ推定する。これによって、出発地ごとの居住者の単位時間あたりの移動時間の機会費用を求める。次に、その機会費用と一年後の引越し者数との比較をとると、高い相関を得た。

次に、「移動時間の機会費用」と「現在の人口」と「一年後の引越し者数」の間の因果関係をLiNGAMという因果推論の手法によって求めた。これによると、因果の向きは「現在の人口」→「移動時間の機会費用」→「一年後の引越し者数」という因果の向きであることがわかった。つまり、「現在の人口」が多いと、その場所が便利になり「移動時間の機会費用」が高まる。そして、その結果、「一年後の引越し者数」が増えるということになる。本手法の重要な点は「移動時間の機会費用」が「一年後の引越し者数」の主原因であり、これを向上するためには都市計画で向上させることができる可能性があるということである。また、都市開発による、一年後の引越し者数は確認するのに一年の時間がかかるが、休日の人の移動は都市開発後に直ちに反応するので、一年を待たずともその効果を評価することができることである。このため、都市開発がうまく行っているか否かその都度反省的に評価をし、都市計画を修正することができる。

第7章では、都市システムのサブシステムを人の移動データから把握する手法を構築する。これまで、都市のサブシステムを捉えるために、人の移動データから空間的なネットワークを構築し、複雑ネットワークのコミュニティ検知の手法により、都市のサブシステムを把握する研究はなされてきた。しかし、ネットワークの分割手法は様々あるにもかかわらず、既存研究ではどの手法が最も良いものかを検討せずに代表的手法のみを用いた研究がなされてきた。特にこれまでNewmanのクラスタリング手法と、Infomapというクラスタリング手法の両者が用いられてきた。前者は、コミュニティ内部のエッジが密で、コミュニティ間のエッジが疎であるような分割を行う。後者はランダムウォークの滞留からコミュニティを分割する。しかし、これらは人の移動分析には適していないと考えられる。人の都市内の移動は家と目的地の間の比較的規則的な移動である。ここで、似た目的地に移動する住宅地をまとめようとする、Newmanの方法では、住宅地同士では人の移動が密でないためクラスタリングされず、Infomapでは人の移動の循環が起きていないのでこちらもクラスタリングできない。ネットワーク・クラスタリング手法には、エッジに向きがあるような有向ネットワークについて、2部のネットワークとして表してからクラスタリングする手法がある。1つのノードについて、出発地と目的地の両者の役割のノードに分け、それらを2層のネットワークにする。2部ネットワークのクラスタリングには2種類あり、一方は各クラスタがもう一方の側のただ一つのクラスタに主に繋がっていると仮定するものと、各クラスタがもう一方の複数のクラ

スタに繋がっていると仮定するものがある。人間は住んでいる場所から近い場所であれば様々な場所へ移動するため、後者がより人の移動を表す手法であると考えられる。

人の移動から作成されたネットワークのクラスタリング結果を評価する手法はこれまで構築されてこなかった。そこで、本研究では下記の3種類の指標を定量的に求める手法を構築する。まず、第一にクラスタの地理的近接性を評価する。これは、同じクラスタに属する場所が遠くに分散している場合は不自然であるため、地理的近接性が低い場合は良くない結果であると判定する。第二に、2つの異なる平日から得られた人の移動ネットワークは似ていると仮定し、この類似度が高いと良い結果であると評価する。第三に、クラスタリング結果が示す情報量の大きさを評価する。細かくクラスタリングできれば情報量が大きいため、これを良い結果として、評価する。

評価結果は、やはり2部ネットワーク・クラスタリング手法のうち、一つのクラスタが複数のクラスタと繋がると仮定した手法が最も良い結果を示した。本クラスタリング手法は人の移動データを用いたクラスタリング手法として用いられてこなかったため、今後はこの手法による分析で、より適切な研究結果を得ることができると考えられる。

以上、本研究では、都市をシステムとして捉え、様々な都市内の状態を移動データから推測・予測・把握するモデル・手法を提示した。これにより、都市計画は常に都市の状態を推測しながら反省的に計画を修正しながら、良い都市構造を実現することができると期待される。