

京都大学	博士（工 学）	氏名	孫 文喆（SUN WENZHE）
論文題目	Bus Bunching Prediction and Transit Route Demand Estimation Using Automatic Vehicle Location Data (バスロケーションデータを用いたバスバンチングの予測と路線バス利用者の需要推定に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>The availability of massive passive transit data has provided a variety of feasibilities for the public transit operators to deliver better service that is of high reliability and characterizes users' demand. Among these data sources, Automatic Vehicle Location (AVL), Automatic Fare Collection (AFC) and Automatic Passenger Counting (APC) data are commonly used, and they are playing significant roles in different aspects of improving transit services. AVL data contain the spatiotemporal coordinates of the transit vehicles which not only offer service reliability metrics, but also indicate the general traffic condition. AFC and APC data are presenting passenger demand patterns, including boarding flows, alighting flows, passenger loads and, in case of AFC only, origin-destination (OD) flows.</p> <p>AVL data are easier to obtain compared to AFC data. Existing literature shows the effectiveness of AVL data in predicting future arrival times and headways, and providing useful inputs for the models to control bus vehicles in terms of operation velocity and headway in real time. However, the methodology for using bus AVL data to estimate demand has been fairly undeveloped.</p> <p>This research has two main objectives. Firstly, it aims to illustrate the characteristics of bus AVL data, reviewing the conventional applications which are using this data source to make predictions on various items of operators' concern and further extend the existing literature by taking bus bunching as the prediction object. Secondly, it proposes an innovative idea and a novel methodology to estimate bus route OD flows using the bus AVL data as the main data source. It expands the potential of bus AVL data in inferring passenger demand beyond the design purpose of the AVL system. This can help those operators that have limited access to AFC and APC data.</p> <p>The thesis is organized as follows.</p> <p><b>Chapter 1 Introduction</b></p> <p>Chapter 1 describes the background and motivation of this research. It reviews three typical massive passive transit datasets: AVL, APC and AFC. It then summarizes the characteristics of AVL data, including strengths and shortcomings. Then it illustrates objectives and contributions of the thesis as well as thesis outline.</p> <p><b>Chapter 2 Literature review</b></p> <p>Chapter 2 reviews existing literature including a broad range of related aspects: 1) Studies using AVL data; 2) Studies combining AVL data with APC/AFC data; 3) Studies on bus bunching problem: corrective and predictive models; 4) Studies on OD estimation, in particular for public transport. Many of them employ AFC, APC and traditional survey data as the main data source, and some of them involve AVL data to enrich the model input or to solve the technical problems for which AVL data is more suitable. Finally, 5) Studies on passenger load and crowding level estimation and prediction are discussed. Overall, the literature review illustrates that bus bunching prediction and route demand estimation using AVL data are important research directions.</p> <p><b>Chapter 3 Bus bunching prediction</b></p> <p>Chapter 3 develops a bus bunching prediction methodology based on logistic regression and AVL data. It also introduces two existing methods using linear regression and support vector machine as the benchmark. The difference between the newly developed method and benchmark methods is that the former one directly computes the probability of a bunching event to occur while the latter</p>			

京都大学	博士（工 学）	氏名	孫 文喆（SUN WENZHE）
------	---------	----	------------------

ones compute the future headways and then judge if a bunching event is going to occur. A comprehensive comparison is elaborated to display the advantages of the new method. The data of a busy circular bus line in Kyoto City are used for the case study.

#### **Chapter 4 Demand estimation using bus AVL data**

Chapter 4 proposes a methodology to estimate OD flows using bus AVL data as the main data source. A basic dwell time model is implemented to capture the connections between time components provided by AVL data and passenger flows. Considering the under-specification of this estimation problem, Bayesian inference is conducted to estimate the parameters and Markov Chain Monte Carlo (MCMC) methods are used as the solution algorithm. Estimation performance by using bus AVL data is compared with that by adding boarding or alighting counts data to the model input. The AVL data and AFC data are collected in the same observational period to validate the methodology.

#### **Chapter 5 Complex dwell time models**

Chapter 5 discusses complex dwell time models that consider the effect of different payment methods, in-vehicle crowding and bus bunching. In addition, it investigates the improvements that are made by implementing complex dwell time models on the demand estimation, compared with the performance in Chapter 4 based on a basic dwell time model. The data used for this study are based on Kyoto City. In January 2019 an onboard survey was conducted on three lines, collecting data on dwell time, how many people board and alight as well as which payment methods they use. With this data also the effect of shortening the time people require for payment on the service performance can be evaluated.

#### **Chapter 6 Conclusions**

Chapter 6 summarizes main findings of this research. The chapter also points out the limitations in the proposed bunching prediction tool and demand estimation methodology. Finally, it provides future research directions in light of the contributions of this research.

氏名

孫文喆 (SUN WENZHE)

(論文審査の結果の要旨)

近年、膨大なバスロケーションデータが蓄積されてきており、そのようなビッグデータを活用した公共交通サービスの改善が期待されている。既往研究では、バスの到着時間や運行間隔の予測におけるバスロケーションデータの有効性が示されているが、バスサービス水準の低下を招くバスバンキング(団子運転とも称される、複数のバスの連続走行)の発生予測ツールに関する知見は十分に蓄積されていない。また、バスロケーションデータを用いたバス利用者需要の分析や推定に関する手法は開発されていない。本論文は、以上のような背景を踏まえて、バスロケーションデータを活用し、路線バスの時空間軌跡に関する予測モデルの精緻化、および、バス利用者の需要推定に関する手法の開発を試みたものである。

本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

1. バスロケーションデータの時空間特性を活用して、ロジスティック回帰モデルに基づいたバスバンキング発生確率の予測モデルを開発した。バスの運行間隔を予測し、その結果がバンキングの閾値より小さい場合はバンキングと判断する従来の手法、すなわち、線形回帰やサポートベクターマシンに基づく手法と比較して、本論文で考案されたモデルの予測性能の優位性が ROC 曲線により確認された。
2. 開発した予測モデルを用いることで、10 箇所以上先のバス停におけるバスバンキングの発生を、90%以上の的中率で予測できることを示した。この結果は、既存研究における予測精度を大幅に上回るものであり、この予測モデルが円滑な路線バスの運行に大きく寄与することを示唆している。
3. バスロケーションデータに基づいたバス利用者 OD 交通量の推定手法を開発した。具体的には、バスロケーションデータから抽出したバス停における停留時間を確率変数とした階層ベイズモデルを構築した。また、各 OD の一分間当たりの利用者到着率をパラメータとして、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いてパラメータの確率分布を推定した。この推定手法の妥当性について、静岡市で収集されたバスロケーションデータと IC カード利用データを用いて検証し、高い予測精度を有していることを確認した。
4. 推定された OD 交通量をバス停別に集計することにより、バス停別の乗降者数と車内人数の把握を可能にした。これにより、利用者需要の予測が困難であったバス事業者が、各バス停の利用者数で重み付けされた待ち時間を測定することを可能とした。それゆえ、開発した推定手法は、バス運行計画の策定やリアルタイムでのバス運行制御に大いに貢献するものと考えられる。
5. バス停におけるバス停留モデルの精緻化は、利用者需要の推定精度を向上させるので、車内の混雑、バスバンキング、車線の渋滞も考慮した、より高度なバス停留モデルを構築した。構築したモデルを、京都市における乗り込み調査結果に適用することにより、バスバンキングの発生、バス利用者による車内での両替や一日乗車券の購入などの事象が、バスの停留時間に与える影響を定量的に示した。

以上のとおり、本論文は、バスロケーションデータを用いて、路線バスの時空間情報の予測手法、ならびに、バス利用者の需要推定手法を開発したものであり、路線バスの運行改善や、効率的な運行計画の策定に対して、有効な知見とツールを与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年4月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。