

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 9 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420520

研究課題名(和文) 個人間異質性を考慮した都市鉄道の旅行時間信頼性向上便益の推計精度改善に関する研究

研究課題名(英文) Research on the improvement method of user benefit estimation regarding the travel time reliability of urban railway service by considering the heterogeneity of individuals.

研究代表者

高田 和幸 (Takada, Kazuyuki)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：30282867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉄道通勤者を対象とするアンケートを行い、鉄道の利用状況、到着状況に関するデータを収集した。

個々人の到着状況のカーネル密度を推定し、その形状を基に回答者を3つのクラスに分類した。各クラスの到着状況に関する教師データを作成し、SVMを用いて到着状況の類似性に基づく回答者分類を行なった。3タイプに分類した回答者の到着状況を踏まえ、適切な確率分布を適用して、出発時刻決定行動に関するモデル推定を行なった。

その結果、単一の分布を適用するよりも、複数かつ異種の確率分布を適用することで、出発時刻決定(余裕時間設定)の推計精度が高められることが示された。

研究成果の概要(英文)：Recently, decrease in travel time reliability of commuter rail has become a serious issue. Then, an internet survey for railway commuters was conducted and 1000 respondents answered to the questionnaires.

Arrival situation at the destination station was investigated and Kernel density of the difference between desired arrival time and actual arrival time was estimated for each respondent. Respondent was classified according to the similarity of the shape of Kernel density. All respondents were classified into 3 classes. Teacher data for SVM was made for each class. Every respondent was classified into 3 types by SVM.

The departure time decision behavior under the travel time uncertainty was formulated and the buffer time model was estimated by adopting different distributions to each type. As the result, the classification of the respondents and adoption of mixture distribution model were available to estimate travel behavior of railway commuters.

研究分野：土木計画学

キーワード：都市鉄道 所要時間信頼性 混合分布モデル 到着分布 出発時刻決定行動 K-meansクラスタ SVM

1. 研究開始当初の背景

首都圏の鉄道利用者は、「所要時間の短縮」や「新規の路線整備」よりも、「時刻表通りの運行」や「運行停止時間の短縮」といった所要時間の信頼性向上を求めている。また「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2012 (国土交通省鉄道局)」においても、列車の遅延時間短縮の便益計測の枠組みが提示されるなど、所要時間の信頼性への関心が高まっている。

首都圏の鉄道の所要時間信頼性について継続的に調査・分析を行ってきたところ、遅延に対する許容度や、遅着の回避行動については、個人差を考慮して分析することが必要であるという課題が見つかった。

2. 研究の目的

本研究では以下のことを明かにすることを目的とする。

- (1) 鉄道通勤者の到着分布モデルの推定 (カーネル密度推定)
- (2) 到着分布の類型化 (K-means クラスタ分析)
- (3) 到着分布に基づいた鉄道通勤者の分類 (サポートベクターマシン (SVM))
- (4) 分類されたタイプ別の出発時刻決定 (余裕時間設定) モデルの推定 (混合分布モデル)

3. 研究の方法

- (1) 関連研究のレビュー  
所要時間信頼性の評価、個人間の異質性を考慮した各種モデル (潜在クラスモデル, 階層ベイズモデル, 混合分布モデル) に関する既往研究のレビュー。
- (2) WEB 調査の実施  
アンケート調査の設計と WEB 調査の実施。標本数は 1000 とした。
- (3) 到着分布のカーネル密度推定  
鉄道通勤者の理想到着時刻からの乖離の状況を表すカーネル密度を推定する。
- (4) 到着分布の類型化  
カーネル密度の累積分布を導出し、その形状を表すデータ (一定間隔の関数値, 一階微分値, 二階微分値) を作成し、K-means クラスタ分析を行い、到着分布のクラス分類を行なう。なおクラス数の決定は Gap 統計量を基に判断する。
- (5) 回答者の分類  
クラス毎に、クラスに属する回答者の累積分布の平均を取り、これを各クラスの教師データとする。SVM を適用し、累積分布の類似性に基づく被験者の分類を行なう。
- (6) 余裕時間設定モデルの推定  
各クラスに分類された回答者の到着分布の形状に合わせて、適用な確率分布を当てはめてモデル推定を行なう。

4. 研究成果

(1) アンケート調査

本研究では、株式会社マクロミルの調査モニターを活用して、鉄道の利用状況に関するアンケート調査を実施した。調査概要を表 1 に記す。計 1000 名から有効回答を得た。

乗車・降車・乗り換え駅、利用路線に関する回答結果に基づき、経路検索サイト (Yahoo! 乗換案内 2015 年 4 月) を活用して、移動距離と所要時間に関するデータを別途作成した。

表1 調査概要

調査方法	インターネット調査
調査日	平成 27 年 2 月 23, 24 日
対象者	1 都 3 県 (東京, 埼玉, 千葉, 神奈川) 居住者 15 歳以上の有識者 (パート・アルバイト含む) 週に 5 日以上鉄道を利用している者
調査項目	鉄道の利用状況 (通勤時の起終点駅, 乗換駅, 認知所要時間など), 遅延の認識 (遅延遭遇頻度, 損失時間), SP 調査, 個人属性

(2) 到着分布のカーネル密度推定

鉄道利用者の理想到着時刻からの乖離状況を明らかにするため、表 2 の Q6, Q7, Q8 の調査を行った。これらの調査により、到着状況について 17 区分された回答データが得られた。

表2 到着状況に関する設問

設問	回答
Q6 理想の到着時刻の前後 1 分以内に到着できるのは、100 回のうち何回ですか?	10 回
Q7 早着時間の到着状況について	
・1 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	25 回
・2 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・3 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・4 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・5 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・10 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	0 回
・20 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	0 回
・30 分以上早く着くのは 100 回中何ですか?	0 回
Q8 遅着時間の到着状況について	
・1 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	25 回
・2 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・3 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・4 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・5 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	5 回
・10 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	0 回
・20 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	0 回
・30 分以上遅く着くのは 100 回中何ですか?	0 回

得られた早着・遅着の時間を乗車距離 (km) で割り、単位距離あたりの早着・遅着時間を算出した。この距離で標準化した到着状況について、回答者 1000 人のカーネル密度推定

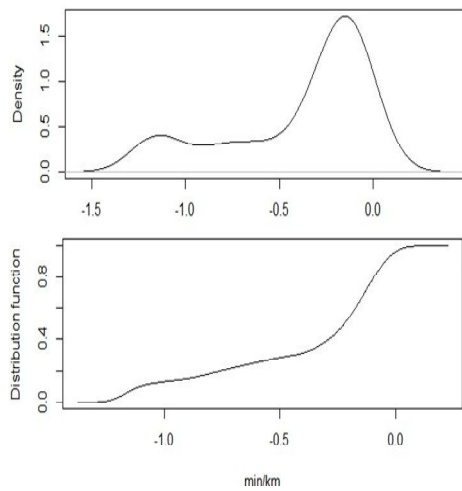


図1 到着分布のカーネル密度(上)とその分布関数(下)

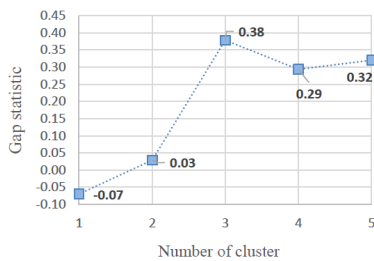


図2 クラスタ数と Gap 統計量

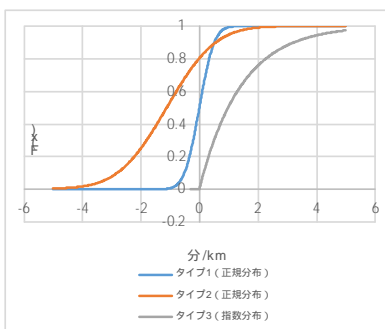


図3 クラスタ毎に平均化した分布関数

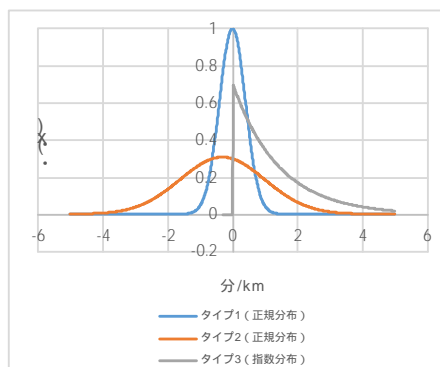


図4 クラスタ毎に平均化した密度関数

と、その(累積)分布関数を求めた。ある個人のカーネル密度の推定結果を図1(上)、その(累積)分布関数を図1(下)に示す。

### (3) 到着状況の類型化

分布関数の形状を表す一階微分値と二階微分値を一定間隔で算出し、K-means クラスタ分析を適用して、分布関数の形状の類型化を行った。K-means クラスタ分析は、分類する数を予め与えた上で行う分析であるため、分類数を特定することができない。そこで本研究では、Gap 統計量を求めて、その値が最大となるクラスタ数をクラスタ数とした。図2はクラスタ数ごとの Gap 統計量を示している。この結果からクラスタ数を3とした。

各クラスタに属する個々人の分布関数を平均化し、3種の分布関数を作成した。図3に結果を示す。

### (4) SVM を用いた個々人の分類

図3に示した3種の分布関数より、その密度関数の形状を求めた(図4)。その結果、到着時刻が理想到着時刻を中心に分布している(タイプ1)、到着時刻が理想到着時刻よりも前に分布している(タイプ2)、到着時刻が理想到着時刻よりも後に分布している(タイプ3)に分類される。

k-means 法クラスタ分析を行い、鉄道利用者の累積分布を外生的に3つに分けて、分けられた累積分布の平均の値を教師データとした。

表3 アンケート回答者の分類結果

分布の特徴	割合 (%)
タイプ1(正規分布):	69.1
タイプ2(正規分布):	14.7
タイプ3(指数分布):	16.2

### (5) 最適出発時刻(余裕時間設定)モデルの推定

(4)により、3つのタイプに鉄道利用者を分類した。次にそれぞれのタイプごとに余裕時間の大きさをどのような要因によって決めているのかを求めた。推定の際には、マルコフ連鎖モンテカル法(MCMC法)を用いた。

タイプ1とタイプ2の鉄道利用者には(1)の数式を用いた。以下に式を示す。正規分布型の到着状況をした鉄道利用者の場合、認知所要時間( $T'$ )が、時刻表に基づく旅行時間( $\mu$ )と余裕時間( $X$ )とで構成されると仮定した。この時の  $X$  の確率密度関数を  $\phi$ 、累積分布関数を  $\Phi$  とする。

$$T' = \mu + \tau_j X \quad (1)$$

$\mu$ : 理想の到着状況からの変動,  $X$ :  $N(0,1)$ の標準正規分布

なお、アンケートで調査した鉄道利用者の認知している旅行時間が最適出発時刻であると仮定すると、最適出発時刻は、時刻表に基づく旅行時間に余裕時間を加えた時間と考えられるため、次式の関数で示すことができる。

$$D^* = \mu + \tau_j \Phi^{-1} \left( 1 - \frac{\alpha}{\beta} \right) \quad (2)$$

$D^*$ : 最適出発時間(認知旅行時間),  $\mu$ : 時刻表に基づく旅行時間

$\alpha$ : 未知パラメータ,  $\beta$ : 鉄道利用者個々人の理想の到着時刻からの

変動,  $\Phi^{-1}$ :  $N(0,1)$ の累積分布関数の逆関数

正規分布型の鉄道利用者に対して、以下のような共変量を設定する。この  $\theta_j$  は、正規分布を一般化線形したものであり、 $\theta_j$  が正規分布に従うと仮定をした。

$$\tau_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \theta_i x_j + \varepsilon_j \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入し変形させることにより、余裕時間を求める式になる。

$$D^* - \mu = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \theta_i x_j + \varepsilon_j \right) \Phi^{-1} \left( 1 - \frac{\alpha}{\beta} \right) \quad (4)$$

タイプ3の鉄道利用者には(5)の数式を用いた。こちらの式は高田らの式を参考に、本研究でも適用した。

$$D^* - \mu = - \left( \frac{\ln \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)}{\lambda \cdot \exp \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \theta_i x_j \right)} \right) \quad (5)$$

表4にMCMC法で推定する際の事前分布の設定条件を示す。本研究では、タイプ1、タイプ2、タイプ3の他にSVMによる分類が有効であるかを確認するために、全員が正規分布型であると仮定をしたモデルを推定した。

表5にMCMC法による推定結果を示す。何れのタイプも共通して、遅延遭遇時間が余裕時間を取る際の要因になっていることが分かる。さらに理想到着時刻の近くに到着しているタイプ1と理想到着時刻より早く着いているタイプ2は、遅延遭遇時間に加えて、乗り換え回数と移動距離が余裕時間の設定に影響していることが読み取れる。

全員が正規分布に従っていると仮定したタイプの推定結果(際右列)を考察する。最適遅着確率は63.8%となった。最適遅着確率とは、遅れて着くことをどれ位許容しているかを示している値である。

また図5は、余裕時間の観測値と推計値の相関関係を示した図である。全員を正規分布と仮定した場合よりも、3つのタイプに分けた方がより再現できていることが読みとれる。

#### (6) まとめ

本研究では、鉄道通勤者を対象にWEBアンケート調査を行い、理想到着時刻からどの程度

の範囲に到着できているかを調査した。到着分布に関するカーネル密度を推定し、その形状に基づく分類を行なった結果、複数の到着状況に分類可能であることが明らかとなった。分類された回答者の到着状況に合う確率分布を特定し、余裕時間設定(出発時刻決定)モデルを推定した結果、複数の分布を適用したことにより、より精緻な推計が可能となることを示した

表4 MCMC法の事前分布の設定

パラメータ/説明変数	タイプ1 (正規分布)	タイプ2 (正規分布)	タイプ3 (指数分布)	正規分布
$\alpha$ /早着パラメータ	U(0, $\beta$ )	U(0, $\beta$ )	U(0, $\beta$ )	U(0, $\beta$ )
$\beta$ /遅着パラメータ	U(0, 10)	U(0, 10)	U(0, 10)	U(0, 100)
$\theta_1$ /通勤移動距離(km)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 50)
$\theta_2$ /乗り換え回数(回)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 50)
$\theta_3$ /遅延遭遇時間(分/週)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 10)	N(0, 50)
$\tau$ /応答変数	N(0, 100)	N(0, 100)	U(0, 5)	N(0, 100)

表5 MCMC法の推定結果

パラメータ/説明変数	タイプ1 (正規分布)	タイプ2 (正規分布)	タイプ3 (指数分布)	正規分布
$\alpha$ /早着パラメータ	1.115*	0.779*	2.370*	37.199**
$\beta$ /遅着パラメータ	5.361**	4.923*	5.116**	58.339**
$\theta_1$ /通勤移動距離(km)	0.071	0.109**	-3.779*	8.827**
$\theta_2$ /乗り換え回数(回)	0.247*	0.257	-5.008**	-9.262
$\theta_3$ /遅延遭遇時間(分/週)	0.114*	0.185**	0.078	1.950**
対数尤度	-682.6	-152.8	-603.1	-3692.3
$\frac{\alpha}{\beta}$ : 最適遅着確率(%)	20.8	15.8	46.3	63.8
サンプル数	691	147	162	1000

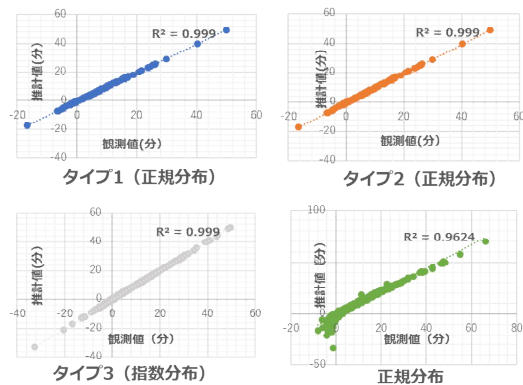


図5 MCMCによる観測値と推計値の乖離状況

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

高田 和幸, 宮内 弘太, 高浪 裕三, 藤生 慎, 混合分布モデルを適用した鉄道通勤者の到着分布の推定, 交通工学論文集, 3, p. A238-A245, 2017, 査読あり.

宮内弘太, 高田和幸, 藤生慎: 混合分布モデルを適用した鉄道通勤者の到着分布の推定, 土木計画学研究発表・講演集, 54, 2016, CD-ROM, 査読なし.

Modelling travel behavior of railway passengers under travel time uncertainty, Proceedings of the 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA), 53-58, 2016, 査読なし.

高浪裕三, 高田和幸, 藤生慎: 多様性を考慮した到着時刻分布の推定手法に関する研究, 土木計画学研究発表・講演集, 50, 2014, CD-ROM, 査読なし.

K. Takada, Y. Takanami, M. Fujiu: Testing a mixture model for the distribution of arrival time of urban railway travellers, Proceedings of the 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA), 903-908, 2014, 査読なし.

[学会発表](計 0 件)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高田和幸 (TAKADA, Kazuyuki)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号: 30282867

(2)研究分担者

屋井鉄雄 (YAI, Tetsuo)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号: 10182289

岩倉成志 (IWAKURA, Seiji)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号: 10182289