

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

高浪 裕三¹・高田 和幸²・藤生 慎³

¹学生非会員 東京電機大学 理工学研究科建築・都市環境学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)
E-mail: 13rmg06@ms.dendai.ac.jp

²正会員 東京電機大学 理工学部建築・都市環境学系 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)
E-mail: takada@g.dendai.ac.jp

³正会員 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 (〒921-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

近年、旅行時間の信頼性評価に対する関心が高まっている。これまでの研究の多くは、自動車の旅行時間信頼性に焦点を当てたものであり、鉄道の旅行時間信頼性に関する評価事例は限定的であった。そこで本研究では、鉄道利用者の旅行時間信頼性に対する評価について調査・分析を行った。

鉄道利用者は、鉄道による移動が遅れることを経験的に認知し、予め余裕時間を設定して出発時刻を決定していると考えられる。著者らは、すでに首都圏鉄道における鉄道利用者の出発時刻決定について調査し、個人間異質性を考慮した希望到着時刻分布推定のためのモデル式を構築した。しかしこのモデル式では、鉄道利用者の遅延時間は常に指数分布に従うと仮定しなければならず、実際の鉄道利用者の行動特性を反映していない可能性が考えられる。

そこで本研究では、鉄道利用者の到着時刻分布が持つ多様性を、混合分布を適用することで、より実行動に近い交通行動特性を推定できないかを試みる。

Key Words : *urban railway, reliability of travel time, mixture distribution model*

1. はじめに

近年、首都圏における列車の遅延本数は増加傾向にある。国土交通省の鉄道輸送トラブルに関する調査¹⁾によると、輸送障害により影響を受けた列車数(1都4県)の総計は、2009年度時点で4万本超となっている。

また、高田らの調査²⁾によると、首都圏の鉄道利用者は「所要時間の短縮」や「新規路線の整備」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。

軌道系交通機関の特徴である時間厳守性が確保されなければ、利用者は一定時間の遅延を見込んで出発時刻を決定せざるを得ず、所要時間の増大という不便を被ることになる。このようなことから、鉄道の所要時間信頼性を向上させるための取り組みが必要である。

一方、2012年7月に改定された「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、列車の遅延時間短縮便益の計測方法が示されている。

このように、近年、交通の所要時間信頼性への関心が

高まっており、所要時間信頼性向上による利用者便益の推計システムの開発が高田ら²⁾によって進められてきた。

しかし、遅延による遅着を回避するために設定する余裕時間の推計を通じて評価するシステムを構築する過程で、下記の2つの課題を解決することが必要となった。一つは、個人によって遅着回避(≒余裕時間設定)に結び付く遅延水準が異なること、他方は、個人によって認知している到着時刻の分布(≒所要時間分布)の形状そのものが異なることである。

そこで本研究では、この2つの課題を解決するアプローチとして、鉄道利用者の到着時刻分布推定に混合分布モデルが適用できないかを考察した。

2. 既往研究

すでに道路交通を対象として、旅行時間信頼性の評価を行った研究が数多くある。その多くは「平均-分散アプローチ」、「スケジューリングアプローチ」の2つのモデリングを用いている。

「平均-分散アプローチ」では、旅行時間をその平均と標準偏差の線形和で表現している。これは、旅行者は、旅行時間の長さとはばらつきをトレードオフの関係で捉えていると解釈できるモデルである。また、「スケジューリングアプローチ」は、決まった時刻までに目的地に着かなければならないという到着時刻制約を持つ旅行者が、早着・遅着によって被る不効用を最小にするように出発時刻を決定する、ということ considering モデルが構築されている。

一方、Fosgerau³⁾、Fosgerau and Karlstrom⁴⁾らは、これら2つのアプローチを統合した、新たなモデリング手法を開発している。

この統合アプローチを援用して、高田ら²⁾は、鉄道利用者の遅延時間が特定の確率分布に従っていると仮定し、余裕時間を推計するモデルの構築を行っている。

しかしながら、図-1 に示すような、鉄道利用者が設定する余裕時間が特定の分布に従っているという強い仮定は、必ずしも成立していないことが著者らの分析で明らかになった。その中で、鉄道利用者の到着時刻分布は、図-2 に示すように、4つのタイプに分類された。

以上、旅行時間信頼性に関する既往研究及び鉄道利用者の到着時刻分布に関する既往研究について整理した。

そこで本研究では、鉄道利用者の到着時刻分布について、分類数を考慮した確率分布を到着時刻分布に適用するため、混合分布モデルの適用について検討する。また、その第一段階として、混合分布の要素を正規分布に限定した混合正規分布モデル(Gaussian Mixture Model, GMM)の推定を行う。

3. 使用データの概要

近年、インターネット・モニター調査は、サンプル数確保や回答結果の信頼性が高いなどの利点から信頼できる調査手法として確立されつつあり、総務省による調査においても利用されている。

そこで本研究では、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。調査対象者は、首都圏の1都3県（東京・神奈川・千葉・埼玉）に居住する15歳以上の有職者（パート・アルバイトを含む）とした。調査は、平成24年3月28、29日の2日間で計1418サンプルの回答を得た。

本研究では、図-3 に示すアンケート調査で得られた、通勤で使用する路線、認知所要時間、鉄道利用者が複数回の移動を行った際の到着時刻の変動に関する質問を行った。また、アンケートで収集した認知所要時間（乗車駅から降車駅までの移動に要すると認知している時間）より、時刻表に基づく所要時間（理想の所要時間）が、

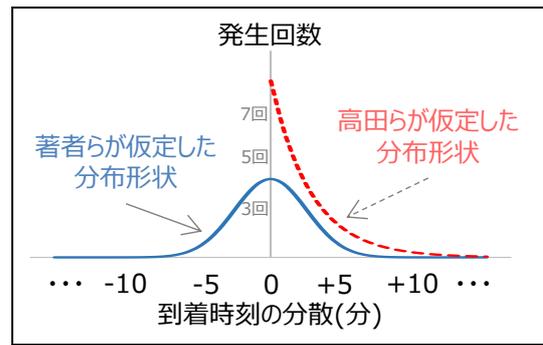


図-1 鉄道利用者の到着時刻分布による類型

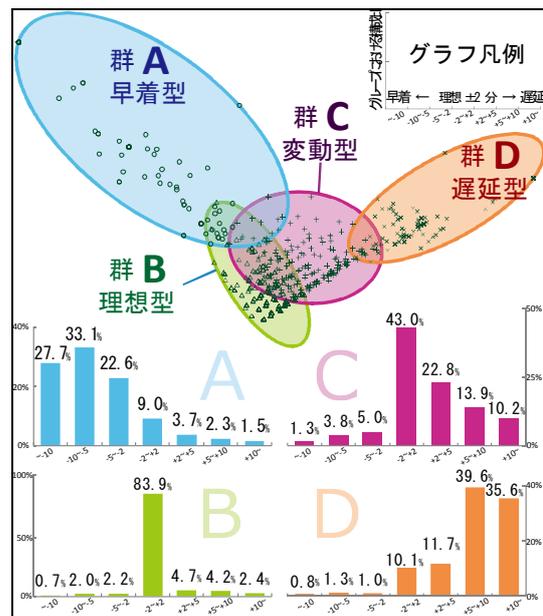


図-2 鉄道利用者の到着時刻分布による類型

Q1 出勤時の移動経路(乗車駅・乗り換え駅・降車駅)をお答えください。途中で乗換えている場合には、乗り換え駅についてもお答えください。

【乗車駅について】

鉄道事業者名 (例: JR)
 路線名 線 (例: 山手)
 駅名 駅 (例: 池袋)

【降車駅について】

鉄道事業者名 (例: 東急)
 路線名 線 (例: 田園都市)
 駅名 駅 (例: すすヶ台)

Q2 Q1で回答した区間を移動するのに、乗車駅から降車駅までのかなりの時間がかかると想定していますか。

通常 時間 分くらいかかっている

Q3 Q2で回答した時間よりも短い時間で移動できるのは10回のうち何回ですか。また長く時間がかかるのは10回のうち何回ですか。

Q2の時間通りに移動できるのは、10回のうち 回
 Q2の時間よりも短く移動できるのは、10回のうち 回
 Q2の時間よりも時間がかかるのは、10回のうち 回

図-3 アンケート調査内容（一部抜粋）

10 回中何回早いのか、遅いのか、概ね同じなのかを所要時間差一回数（10 回中）を表-1 のように表し、希望到着時刻と実際の到着時刻を分布化した。

表-1 所要時間の分布（一部抜粋）

		所要時間						
		~-10分	-10~-5分	-5~-2分	-2~2分	2~5分	5~10分	10~分
サ ン プ ル N O. 1	1	0	0	2	3	0	0	5
	2	0	0	0	10	0	0	0
	3	0	0	0	10	0	0	0
	4	0	0	1	7	0	2	0
	5	0	1	1	4	2	0	2
	6	0	0	2	3	0	5	0
	7	0	0	1	2	1	5	1
	8	0	3	0	0	2	3	2
	9	0	0	0	6	2	1	1
	10	0	0	0	8	1	0	1
...	
1416	0	0	0	9	0	1	0	
1417	0	2	1	2	0	3	2	
1418	0	0	0	6	1	2	1	

4. 混合正規分布(Gaussian Mixture Model)の適用

(1) 混合分布について

混合正規分布は、単純な正規分布が要素となり、それらが組み合わされた多峰性を持つ分布のことである。

入力を x , 平均 μ , 分散 Σ とした要素分布を

$$\phi(x; \mu_m, \Sigma_m) \dots\dots\dots (1)$$

とするとき、 M 個の正規分布を要素モデルとする混合モデルの確率密度関数は

$$p(x; \theta) = \sum_{m=1}^M \pi_m \phi(x; \mu_m, \Sigma_m) \dots\dots\dots (2)$$

で表される(図-3)。 θ は全てのパラメータを表しており、この最尤推定を行うことで分布の形状が推定できるが、 i 番目の要素モデルを示すラベル m_i が未知であるため計算が困難である。この未知データの期待値を、反復計算を行い推定するのが、以下に表す EM(Expectation-Maximization, 期待値最大化)アルゴリズムである。

まず E-step では、 θ の初期値 $\theta^{(t=0)}$ に値を入力し、以下を計算する。

$$Q(\theta, \theta^{(t)}) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M p(m | x_i; \theta^{(t)}) \log p(x_i, m; \theta) \dots\dots\dots (3)$$

次に、M-step で Q 関数を最大にする θ を求める。

$$\theta^{(t+1)} = \arg \max_{\theta} Q(\theta, \theta^{(t)}) \dots\dots\dots (4)$$

$\theta^{(t)}$ と $\theta^{(t+1)}$ を比べて、増幅が一定値以下となったら収束したとみなして計算終了、そうでなければ $t = t + 1$ して(3)式に戻り、再計算を行う。

以上(3)、(4)式により、パラメータ θ の最尤推定量が求まる事で、混合モデルの分布形状が推定できる。これらを用いて、鉄道利用者の認知到着時刻の分布形状を推定する。

(2) 推定結果

鉄道利用者の希望到着時刻を、混合分布を用いて推定した結果、4つの要素モデルを基とした混合正規分布モデルが得られた。各要素モデルの重み（分担率）、平均、分散を図-4示す。また4種類の異なる色で描かれた曲線は、要素モデルの確率密度関数を表し、黒の破線は推定された混合分布の確率密度関数を表す。

この図から、希望到着時刻が実際の到着時刻よりも早

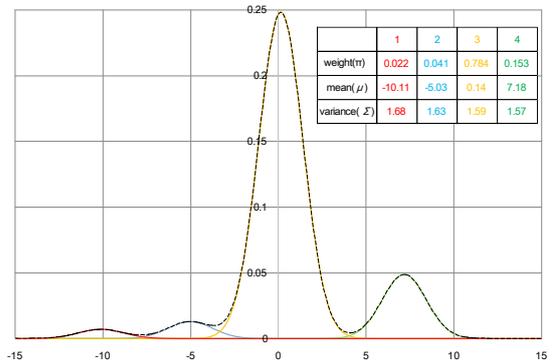


図-4 混合分布による希望到着時刻の推定結果

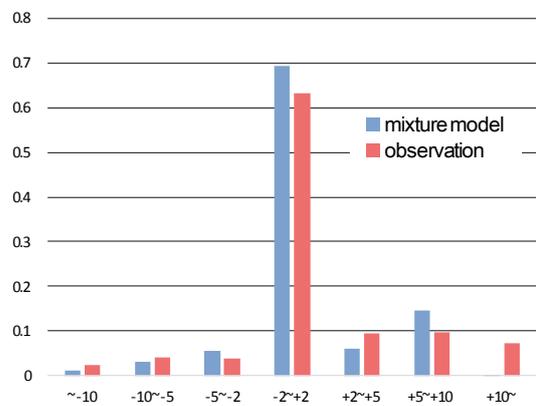


図-5 混合分布モデルの再現性

い早着型の分布が2つ、希望到着時刻と実際の到着時刻の差が少ない通常型の分布が1つ、希望到着時刻が実際の到着時刻よりも遅い遅着型の分布が1つがあることが分かる。

これらの推定結果から、指数分布では表せない「早着型」の存在や「分布形状の多峰性」といった特徴が考慮された、実行動に近い到着時刻分布の推定が行えている

と考えられる。

さらに、アンケートでの調査方法に合わせ、推定した混合分布を7点のヒストグラムで示す(図-5)。今回の推定では離散型のデータを用いたため、“10分以上遅れる”という分布が表現できなかったが、その他の6点については、概ね実行動を反映した推定が行えていると考える。

5. まとめと今後の展望

著者らが以前行なっていた研究では、鉄道利用者の到着時間の分布は指数分布に従うとしており、出発時刻を推定する際の制約条件であった。しかし、希望到着時刻と実際の到着時刻との差が、常に指数分布に従うとは言い切れない事が懸念された。

そこで、本研究では混合分布モデルを用いて鉄道利用者の到着時刻分布を表現できないかを試み、早着型や遅着型、分布の多峰性といったような、多様な到着状況を考慮することができることを確認した。

今後の展望として、鉄道利用者個々人の認知余裕時間分布の形状をより一般化するためには、様々な確率分布を混合して表すことが必要である。そのために、異なる

分布同士が混合された、異種混合モデルの構築を行う予定である。

また今回の反省点として、到着時刻分布が離散データになってしまっている事が上げられる。今後、異種混合モデルの構築を行う際には、連続データが得られるようにしなければならないと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 [2009], “鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査結果の概要”
- 2) 高田和幸, 鈴木孝典, 藤生慎: 鉄道の遅延時間を考慮した出発時刻決定行動に関するモデル分析, 土木学会論文集D 3 (土木計画学), 68, 5 (土木計画学研究・論文集, 29), 2012.
- 3) Fosgerau, M.: The value of reliability and the distribution of random durations, Poceedings of the European Transport Conference (ETC), 2007.
- 4) Fosgerau, M. and Karlstrom, A.: The value of reliability, Transportation Research Part B, Vol. 44, No.1, pp. 38-49, 2010.

?

RESEARCH ON THE ESTIMATION METHOD OF ARRIVAL TIME DISTRIBUTION CONSIDERING VARIETY OF THE DISTRIBUTION

Kazuyuki TAKADA, Yuzo TAKANAMI, and Makoto FUJII

Recently the evaluation of the travel time reliability has become great concern in transportation planning and many studies have investigated the travel time reliability. However most of them have focused on the reliability regarding road transports. Then the reliability of rail transport is focused on in this study.

Authors have already investigated the departure time decision of railway users in Tokyo Metropolitan area (TMA) and developed a model describing a spare time for not being late behind the desired arrival time by considering the heterogeneity of the distribution of the late arrival.

In order to estimate the coefficients of the model, we set a strong condition that the railway users in TMA recognized that the delay of arrival time obeyed exponential distribution. However the difference between the desired arrival time and the actual arrival time does not always obey exponential distribution. Then, we started the research to ease this strong condition by adopting the mixture distribution model. There are few studies investigating departure time decision dealing the mixture model.