ボトムアップ的アプローチによる乗客のトリップパターン推定モデルの構築

宮崎大学　学生会員　平井一成
宮崎大学　正会員　　嶋本　寛

1. 研究の背景と目的

地球温暖化の抑制や，都市の活性化の観点から公共交通の利用促進が叫ばれている．公共交通事業者は，利用促進や混雑緩和のための適切な対策をとるためには，乗客のトリップパターンを正確に把握することが必要である．しかし，大都市圏のバス交通では均一料金制度がとられている事業者が少なからず存在するが，そのような事業者では整理券データや近年活用されている IC カードを用いてトリップパターンを把握することはできない．

以上を踏まえて，本研究では均一料金制度がとられている大都市におけるバス事業者への適用を念頭におき，乗客のトリップパターンの推定手法を構築することを目的とする．さらに，仮想ネットワークにおいて構築するモデルの推定精度の検証を行う．

2. 乗客のトリップパターン推定モデル

(1) 推定手法の概要

本研究で対象とする均一料金制度がとられているバス事業者においては，IC カード利用者は乗車時，あるいは降車時のいずれかしか IC カードをタッチする必要がないため，IC カード利用履歴データから直接に乗降パターンを把握できない．そこで，本研究では図-1 に示すように，系統単位における乗り換えを考慮しない OD パターンであるレグ（leg）を推定する第 1 段階と，乗り換えを考慮した OD パターンであるジャーニー（journey）を第 1 段階で推定したレグ OD パターンを用いて推定するという，ボトムアップ的な推定する方法論を採用する．なお，本稿では降車時に料金を支払うバス事業者におけるトリップパターンの推定手法について述べるが，第 1 段階における乗車人数と降車人数の制約条件を入れ替えるだけで，乗車時に料金を支払うバス事業者への適用も可能となる．各段階における推定手法を，次節以降で述べる．

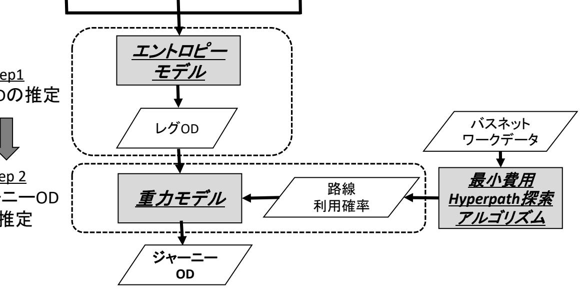

図-1　推定手法の概要

(2) レグ OD パターン推定モデル

第 1 段階においては，IC カードの利用履歴データ，乗り込み調査等により得られる事前 OD 情報，および一部バス停で観測される乗車人数を入力データとして，佐佐木のエントロピーモデル [1)] をベースにして，系統ごとに生起する確率が最大となる乗降パターン（レグ OD）を推定する．第 1 段階におけるモデルは以下のように定式化できる．

$$\min_{x_{ij}^{r_l(\tau)};i<j\le N} \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{n-1}\left(x_{mn}^{r_l(\tau)}\ln\frac{x_{mn}^{r_l(\tau)}}{q_{mn}^{r_l(\tau)}}-x_{mn}^{r_l(\tau)}\right)$$

$$,\forall l\in L, r\in R_l, \tau\in T \qquad (1)$$

such that

$$\textstyle\sum_{i\le n}\sum_{j\ge n+1} x_{ij}^{r_l(\tau)} \le C_{r_l}$$

$$,n=1,2,\dots,N_l-1,\ r\in R_l, l\in L, \tau\in T \qquad (2)$$

$$\textstyle\sum_{i\le n} x_{in}^{r_l(\tau)} = \alpha Y_n^{r_l(\tau)}\ ,n=1,2,\dots,N_l,\ r\in R_l, l\in L, \tau\in T \qquad (3)$$

$$\textstyle\sum_{n<j\le N} x_{nj}^{r_l(\tau)} = X_n^{r_l(\tau)}\ ,n\in B_l, r\in R_l, l\in L, \tau\in T \qquad (4)$$

ただし,

L	:	路線集合
R_l	:	路線$l\in L$におけるバス走行の集合
T	:	時間帯の集合
N_l	:	路線$l\in L$におけるバス停の集合（起点から順に番号を振るものとする）
B_l	:	路線$l\in L$において乗車人数を計測するバス停の集合
C_{r_l}	:	バス$r\in R_l, l\in L$の車内容量
$X_n^{r_l(\tau)}$	:	バス$r\in R_l, l\in L$の時間帯$\tau\in T$におけるバス停$n\in B_l$における乗車人数
$Y_n^{r_l(\tau)}$	:	バス$r\in R_l, l\in L$の時間帯$\tau\in T$におけるバス停nにおける降車人数
α	:	IC カード利用率から推定される拡大係数
$x_{mn}^{r_l(\tau)}$	:	バス$r\in R_l, l\in L$，時間帯$\tau\in T$におけるmn間の乗客需要（未知変数）
$q_{mn}^{r_l(\tau)}$	:	バス$r\in R_l, l\in L$，時間帯$\tau\in T$におけるmn間の乗客需要の事前データ

制約条件(2)は，バス$r\in R_l, l\in L$のバス停$n,(n+1)$間の乗車人数が車両容量を超過しないという容量制約を表している．また，制約条件(3)および(4)は，バス$r\in R_l, l\in L$のバス停nにおける降車および乗車人数が，それぞれ IC カード利用履歴データから推定される降車人数，および一部のバス停で直接計測する乗車人数と一致するということを表している．式(1)におけるレグ OD 需要に関する事前情報$q_{mn}^{r_l(\tau)}$は，乗り込み調査により得られると想定する．

(3) ジャーニーOD パターン推定モデル

第 2 段階においては，ジャーニーOD の路線利用確率を与件として，枦元ら [2)] を参考に乗り換えを考慮した OD パターンであるジャーニーOD とレグ OD の関係を定式化した上で，ジャーニーOD から推定されるレグ OD パターン

が第1段階で推定されたレグODパターンを時間帯，路線別に集約したものと整合するように，ジャーニーOD を推定する．

いま，ジャーニーOD は以下に示すような重力モデルにより記述できるものとしよう．

$$\hat{T}_{OD}^{\tau} = (NB_O^{\tau})^{\alpha}(NA_D^{\tau})^{\beta}(d_{OD})^{\gamma}(LOS_{OD}^{\tau})^{\delta}, \forall O, D \in N \quad (5)$$

ただし，

NB_o^{τ}	:	時間帯$\tau \in T$におけるバス停$O \in N$における乗車人数
NA_D^{τ}	:	時間帯$\tau \in T$におけるバス停$D \in N$における降車人数
d_{OD}	:	OD間の直線距離
LOS_{OD}^{τ}	:	時間帯$\tau \in T$におけるOD間の一般化費用
N	:	バス停の集合
α, β, γ, δ	:	推定すべきパラメータ

さらに，ジャーニーOD の路線利用確率が与件のとき，ジャーニーODとレグODには以下の関係式が成り立つ．

$$\hat{y}_{mn}^{l(\tau)} = \sum_{OD\in\Omega} \hat{\mu}_{rs,l}^{OD}(\tau)\hat{T}_{OD}^{\tau}, \quad \forall mn \in \omega, r \in R_l, l \in L, \tau \in T \quad (6)$$

ただし，

Ω	:	ジャーニーのODペアの集合
ω	:	レグのODペアの集合
T_{OD}^{τ}	:	時間帯$\tau \in T$におけるジャーニーOD の需要
$\mu_{rs,l}^{OD}(\tau)$	:	T_{OD}^{τ}の路線l，rs間の利用比率
$\hat{A}$	:	Aの推定値

ここで，式(6)によりジャーニーOD から求められるレグOD と，第1段階で推定したレグOD の誤差率が平均0の対数正規分布に従うと仮定する[2]と，全レグペアにおける同時確率密度は以下のように表せる．

$$L_{\tau} = \prod_{mn,l}\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{1}{2}\frac{\left\{\ln\left(\tilde{y}_{mn}^{l(\tau)}\right) - \ln\left(\hat{y}_{mn}^{l(\tau)}\right)\right\}^2}{\sigma^2}\right)\right]^{\delta_{mn}^{l}} \quad (7)$$

ここに，σ^2は推定対象の分散パラメータであり，δ_{mn}^{l}は路線$l \in L$にレグODペアmnが含まれていれば1をとるダミー変数である．また，$\tilde{y}_{mn}$は第1段階で推定したレグODパターン$\hat{x}_{mn}^{r_l(\tau)}$を式(8)により時間帯，路線別に集約したレグODパターンであり，$\hat{y}_{mn}$は式(5)により第2段階で推定するジャーニーOD パターンを式(6)によりレグOD パターンに変換されるものである．

$$\tilde{y}_{mn}^{l(\tau)} = \sum_{r\in R_l(\tau)} \hat{x}_{mn}^{r_l(\tau)}, \forall mn \in \omega \quad (8)$$

式(5)に示したパラメータは，式(7)に示したLを尤度関数とする最尤推定法により時間帯ごとに求めることができる．

なお，本研究で構築するモデルは複雑な路線網が形成され，また高頻度のバスサービスが提供されている都市部への適用を念頭に置いているため，ジャーニーOD の路線利用確率$\mu_{rs,l}^{OD}(\tau)$および重力モデルの説明変数であるジャーニーOD ペア間の一般化費用は最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズム[3]により求める．

3. モデルの性能評価

本章では，仮想的なバスネットワークを想定し，構築したモデルの性能評価を行う．紙面の都合上，ある地方都市において実施された乗り込み調査から得られた1つの系統のOD表を真値として，第1段階のレグODパターン推定モデルについて検討した結果のみを示し，第2段階も含めた推定精度の検証結果は，講演時に示す予定である．なお，当該都市において降車時に料金を支払う均一料金制度をとっており，ICカード利用履歴データからは乗車人数を把握することはできない．検証に用いた系統のバス停数は56で，未知変数であるレグODペア数は1540である．

まず，レグ需要の事前情報の誤差，乗車人数の計測誤差，および IC カード普及率から推定される拡大係数の誤差に起因する降車人数の誤差のそれぞれの平均を3水準想定し，実験計画法によりそれぞれの誤差を組み合わせて**表-1** に示す9ケースを設定した．各ケースについて，乱数を10回発生させ入力データを作成し，推定を行った．**図-2** に推定精度の比較を示すが，事前情報の観測誤差が推定精度に影響を及ぼすものの，観測精度が低下しても推定精度は大きく低下しないといえる．次に，乗車人数を計測するバス停の比率と推定精度の関係を**図-3** に示す．乗車人数を計測するバス停の比率が少なくても精度よく推定できることを確認できるものの，観測する比率が大きくなるに従い制約条件数が多くなるため，推定精度が低下するといえる．

＜参考文献＞

1) 佐佐木綱：トリップのOD分布を求める確率的方法，交通工学，2(6), 12-21, 1967
2) 枡元淳平, 奥村誠, 塚井誠人:純流動データによる都道府県間純流動の逆推定:土木計画学論文集 21(1) 83-89 2004
3) 倉内文孝，嶋本寛，王萍，飯田恭敬：最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究，土木計画学研究・論文集，23(3)，755-761，2006

表-1　設定したケース

ケース	観測誤差		
	事前情報	乗車人数	降車人数
1	0.1	0	0.1
2	0.1	0.05	0.2
3	0.1	0.1	0.3
4	0.2	0	0.2
5	0.2	0.05	0.3
6	0.2	0.1	0.1
7	0.3	0	0.3
8	0.3	0.05	0.1
9	0.3	0.1	0.2

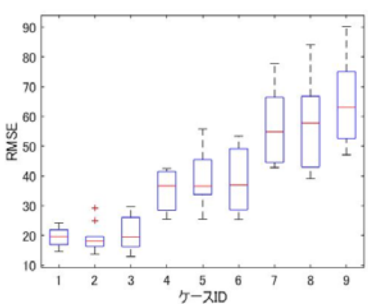

図-2　観測誤差と推定精度の関係

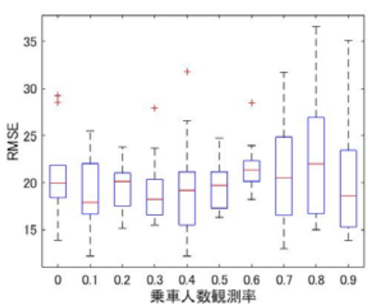

図-3　観測箇所と推定精度の関係