

# 一般化座標を用いた歩行者の確率的空間選択

福山 祥代<sup>1</sup>・羽藤 英二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: fukuyama@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、プローブパーソン調査による移動軌跡観測データを用いて、都市空間上の歩行者移動における通行領域と領域通過時間の選択モデルを構築し、歩行者による時空間利用の空間的分布を把握する手法を提案する。個人ごとのOD間移動について、Dを中心として単位距離ずつ小さくなる円座標上を進む過程とみなし、単位区間ごとの進行方向と時間配分の逐次的な意思決定を記述する。このとき効用を生み出すものとして、OD間の時空間制約下で得られる確率的通行領域を考える。予め固定されたゾーンではなく、ODベースでの確率的空間を用いることで、特徴をもった空間範囲を歩行者行動データから抽出することを試みる。進行方向選択と時間配分の記述には動的離散連続モデルを援用し、現在区間での選択において残り区間全体の効用も考慮することで、街路上の歩行者のより現実的な意思決定を表現する。

**Key Words:** *Pedestrian, Time-space choice, Dynamic activity domain, Discrete-continuous choice model, Generalized coordinates*

## 1. はじめに

1km 四方程度の都市空間においては、歩行者の流動状況が、街の活性度や商業の成立性などに大きく影響する。歩行者がどこを通るかという空間選択の問題に加えて、歩行速度や滞在時間といった時間選択の問題も、空間に対する歩行者の価値判断を捉える重要な指標となる。一方、ゾーン単位、アンケートベースのパーソントリップ調査では把握できなかった歩行スケールの行動の詳細な時空間軌跡が、GPS等の測位技術と移動通信技術の普及によって観測可能となっている。取得されるデータをもとに歩行者の時空間選択行動を分析・予測する手法の構築が、施設や街路の再編等において有効な計画を策定する上で求められている。

ネットワーク上の移動は、主に経路選択モデルにより表現されてきた。逐次的なリンク選択モデル (e.g. 竹上・塚口, 2006<sup>1)</sup>) やプレトリップ型の経路選択モデル (e.g. Gou and Loo, 2013<sup>2)</sup>)、近年では動的な逐次リンク選択を扱う Recursive logit モデル (Fosgerau et al., 2013<sup>3)</sup>) などが提案されている。経路選択に時間要素を導入する試みとしては、伊藤・羽藤 (2013)<sup>4)</sup> などが挙げられる。また、施設空間内のマイクロな歩行者行動に関しては、2次元平面上の自由度の高い動きを表現する多様なモデルが提示されている。空間表現はセルや連続平面など多様だが、経路選択行動に着目すると、次のタイムステップに進む選択肢を逐次的に決定するものが多数を占めており、目的地までの間の残りの経路の効用

を考慮して選択を行うものは、Hoogendoorn and Bovy (2004)<sup>5)</sup> などに限られている。リンク、二次元平面の違いに関わらず、各回次の選択肢のみに着目して選択を行うとする手法は、残り時間や残りの距離など移動過程における段階の違いが意思決定に与える影響の考慮や、先の経路を考慮した大局的な意思決定の表現が難しいという問題がある。これらに対応可能なものとして、Bellmanの最適性原理 (Bellman, 1957<sup>6)</sup>) を用いて先の選択肢を再帰的に導入した Recursive logit モデルや Hoogendoorn and Bovy のモデルがあるが、先の膨大な経路選択肢の状態をすべて把握しているとする仮定が、人の認知能力に照らして非現実的であるという課題がある。

また、空間分析の観点からは、最初からリンクレベルの分析をするよりも、空間領域を対象に選択傾向や通過速度を捉えた方が、ネットワークの大局的な特徴や空間的相互関係を理解しやすい場合がある。例えば、足早に通り抜ける領域と、うろうろ歩き回ったりする領域では、空間の特性が人の行動に及ぼす影響が異なっ

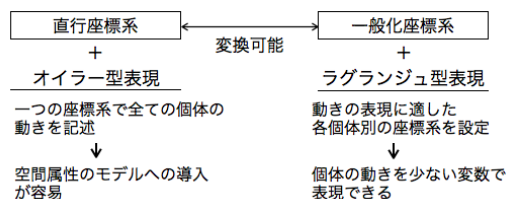


図-1 座標系

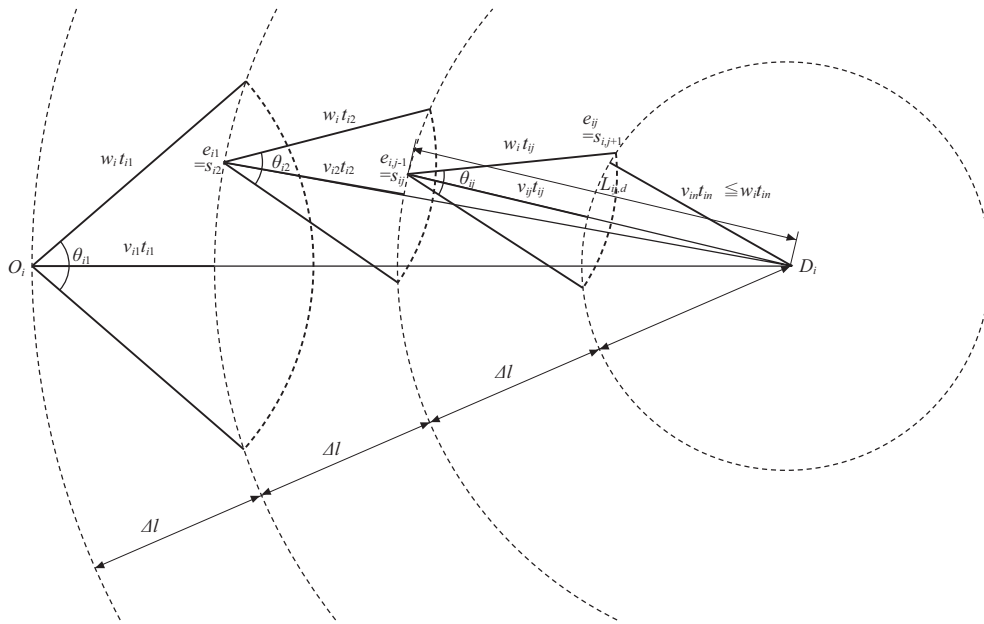


図-2 円座標と選択肢の定義

ていることが予想される。共通の性質をもつ領域として抽出される空間範囲やその特性の情報は、面的な都市空間の計画を行う上で、特に計画の初期段階において有用である。

これらの課題に対し、本研究では、リンクや経路ではなく確率的な空間領域を選択対象と仮定した意思決定モデルを提案する。OD間の移動について、(1)目的地までの残りの距離に基づき複数区間に分割し、(2)各区間ごとに、進行方向に付随する確率的な活動領域（通過空間領域）を逐次的に選択する過程と考える。このとき、(3)当該区間の選択に伴い時間制約下で生じる目的地までの通過可能領域の効用も考慮して意思決定を行うものとする。さらに、(4)空間領域の離散的選択と同時に、現在の区間への時間配分も決定するものとし、相互に関係する空間・時間の選択を、ランダム効用最大化理論に基づく離散・連続選択モデルを用いて記述する。これにより、詳細な経路選択肢でなく先の通行空間を領域として考慮しながら、直面する区間における時空間選択を逐次的に行っていく意志決定を表現する。大まかな行程計画を行いつつ現実的に認知・判断できる近傍の領域を対象に具体的な時間・空間利用を決定する、自由度の高い歩行者行動の再現を試みる。

以上の行動を記述する上で、本研究では、空間側に固定された座標ではなく、個人ごとのODを基準とした一般化座標を用いる。既往研究において、経路や目的地に関する離散選択モデルの多くは、空間側に固定された共通の座標系を用いて選択肢が表現されている。リン

ク、セル (e.g. Blue and Adler, 2001<sup>7)</sup>; Guo et al., 2011<sup>8)</sup>)、交通調査ゾーン (e.g. Bhat and Guo, 2004<sup>9)</sup>) など、形状が予め定義された空間の離散化表現を用いることで、選択肢の属性や状態量を記述することが容易になる。これに対し、例えば Antonini et al. (2006)<sup>10)</sup> では、移動の都度現在地を基準に進行方向と速度に関する離散選択肢を生成する個人ベースの動的な座標表現を用いている。一般化座標系とラグランジュ型表現による個人ベースの座標を用いる利点は、個人の主観的な空間認識に基づく意思決定を、シンプルな変数で表現できることにある (図-1)。本研究においても、個人ごとのOD及び時間制約に依存した通行可能領域を記述する上で、個人ベースの座標表現が適している。一方で、空間側の属性を離散選択肢によって表現することは難しくなるが、予め恣意的に設定されたゾーン等の境界が、特性の共通する空間範囲の境界と一致しているケースは少ない。本モデルでは、個人の移動過程で選択される確率的空間領域を最終的に固定座標上で重ね合わせた結果によって、特性の共通する空間範囲を抽出することで、空間特性の分析に用いることを想定する。

本稿では、以上に述べたような歩行者の空間領域・時間配分の逐次的選択モデルについての理論的枠組みを提示する。以下、2章では、本研究で用いる座標空間と選択肢生成過程、効用を発生させる確率的活動領域の生成について説明し、3章において動的離散・連続選択モデルを用いた定式化を行う。4章でモデルのパラメータ推定に用いるプローブパーソンデータの概要を提示

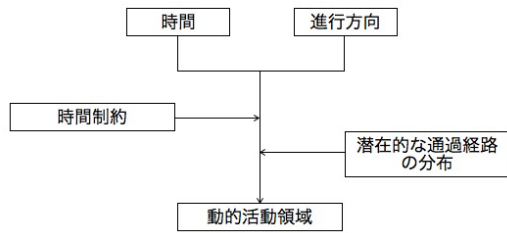


図-3 ダイアグラム

し、5章で結論を述べる。

## 2. モデル空間の記述

### (1) 一般化座標を用いた空間表現

本研究では、モデルの物理的空間の表現に、個人ごとのODを基準とした円座標を用いる(図-2)。各ODペアに対して、目的地Dを中心として半径が $\Delta l$ ずつ小さくなる同心円を考える。次に、出発地Oから目的地Dに向かう行動を、Dまでの直線距離を単位距離 $\Delta l$ ずつ縮めていく過程だと考える。つまり、OD間の歩行者の移動を、Dを中心とする同心円上で1つ小さい円の円周上の点に向かって逐次的に進んでいく過程とみなす。

### (2) 逐次的な領域選択

次に、各 $\Delta l$ における時間制約下での選択枝の生成手法を提示する。図-2にモデルに用いる円座標と選択枝に関する定義を、図-3にモデルのダイアグラムを示す。

個人*i*のODベースの円座標において、*j*番目の区間の始点 $s_{ij}$ と終点 $e_{ij}$ の選択枝集合を考える。また、個人*i*がOD間の移動に充当できる時間制約 $T_i$ を考える。この時間制約により、選択可能な進行方向は限定される。図-2に示すように、利用可能な時間 $t_{ij} = T_i - (L_i - \Delta l * j) / w_i$ 内に始点 $s_{ij}$ から到達できる範囲は、半径 $t_{ij} * w_i$ の円になる。ここで、 $L_i$ はOD間距離、 $w_i$ は最大歩行速度、 $(L_i - \Delta l * j) / w_i$ は残りの区間の必要最小時間である。終点 $e_{ij}$ はDを中心とする半径 $(L_i - \Delta l * j)$ の円上にあることから、この円を、 $s_{ij}$ を中心とする半径 $t_{ij} * w_i$ の円で切り取った範囲が、時間制約下で選択可能な $e_{ij}$ の範囲となる。この切り取られた円弧を一定の長さで分割し離散化したものを選択枝とし、分割された円弧*h*の midpointでそれぞれの終点 $e_{ijh}$ を代表させる。

### (3) 動的活動領域の生成

制約時間 $t_{ij}$ 内に $s_{ij}$ から $e_{ijh}$ まで移動する間に通過する確率をもつ点の集合を、動的活動領域 $A_{ijh}$ と定義

する。 $A_{ijh}$ の形状や位置は、選択する進行方向や利用可能時間によって変化し、それに応じた効用を形成する。図-4に、全体の時間資源を $T_{ij}$ としたときの、各区間で $A_{ijh}$ が取り得る時空間範囲のイメージを示す。図-4の(b)は各区間における利用可能な時間の推移を示し、(c)は時間内で通過可能な領域の平面的範囲を示している。

時空間制約により生成される各区間の楕円内において、各地点の通過確率は均等ではなく、図-5に例示するように、 $s_{ij}$ と $e_{ijh}$ を結ぶ直線の近傍を中心に分布すると考えられる。図-6に示すように、各地点*r*の位置を、 $s_{ij}$ からの距離*d*と、線分 $s_{ij} - e_{ijh}$ に対する $s_{ij} - r$ の角度 $\omega$ によって表すこととし、潜在的な通過点分布を観測データを用いて生成することとする。

分布形は不明であり、 $t_{ij}$ もしくは領域通過速度 $v_{ijh}$ によって $A_{ijh}$ の $s_{ij} - e_{ijh}$ に垂直方向の大きさも伸縮するため、ディリクレ過程により分布を記述し、パラメータを推定することとする。ここで、 $l_{ijh}$ を $s_{ij} - e_{ijh}$ 間の距離とし、領域通過速度は $v_{ijh} = l_{ijh} / t_{ijh}$ で定義される値とする。ディリクレ過程は、基底分布 $G_0$ と集中パラメータ $\gamma$ によって規定される離散分布 $G$ を生成する確率過程 $G \sim DP(\gamma, G_0)$ であり、無限次元の離散分布が生成される。このとき、領域通過速度 $v_{ijh}$ によって分布形状が変化することを表現するために、集中パラメータ $\gamma$ を $v_{ijh}$ の関数として設定する。

## 3. 動的領域選択モデル

相互に関係する領域・進行方向と時間配分の選択問題を、Habib (2011)<sup>11)</sup>による動的離散連続選択モデルを用いて定式化する。以下、煩雑さを避けるために個人を示す添字*i*を省略する。

モデルでは、*j*番目の区間において、選択された領域 $A_j$ と、区間*j*+1から目的地までの複合的な領域 $A_c$ の2つの間で、残り時間の配分を行う逐次的な意思決定を記述する。 $A_j$ と $A_c$ への時間配分 $t_k (k = j, c)$ に伴う効用関数は以下で表される。

$$U(t_k) = \sum_{k=j,c} \frac{1}{\alpha_k} \exp(\psi_k z_k + \varepsilon'_k) (t_k^{\alpha_k} - 1) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_k$ はsatiation parameter、 $z_k$ は説明変数、 $\psi_k$ は係数、 $\varepsilon'_k$ は誤差項を示す。式(1)は次の時間制約下で最適化される(Bhat, 2008<sup>12)</sup>)。

$$t_j + t_c = T \quad (2)$$

Habibのモデルに加えて、本研究では、離散選択の効用関数も残り区間の複合領域 $A_c$ の効用 $V_{c_j}$ を用いて動学化する。 $V_{c_j}$ は、次式に示すように、時間割引率 $\beta$ を乗じて効用関数に導入する。なお、ここでは $\beta$ は所与の固定値とする。

$$U_j = V_j + \beta V_{c_j} + \varepsilon_j \quad (3)$$

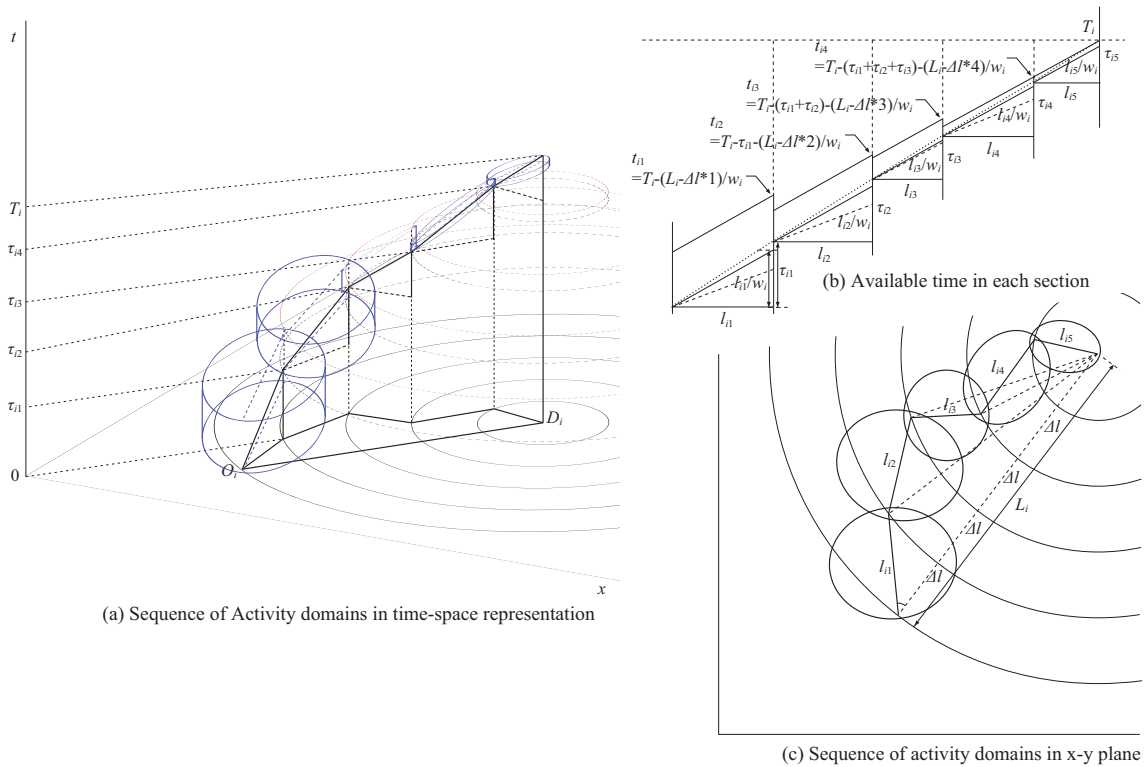


図-4 時空間制約下での通過可能な空間領域の過程

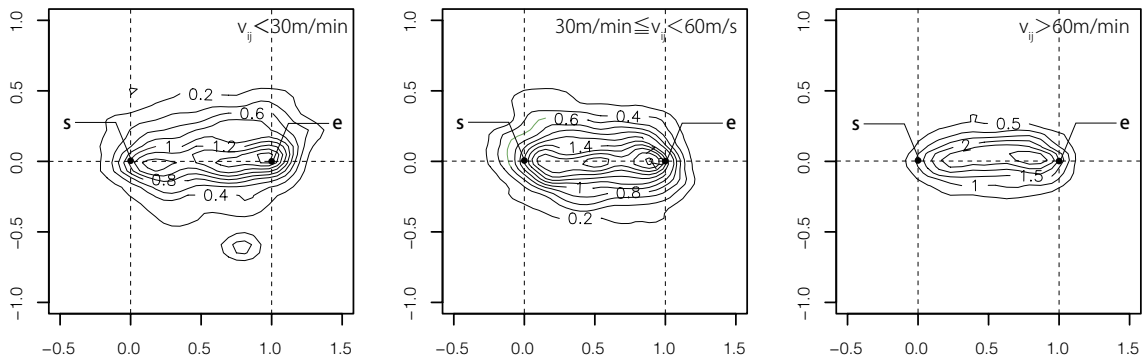


図-5 通過可能点の分布

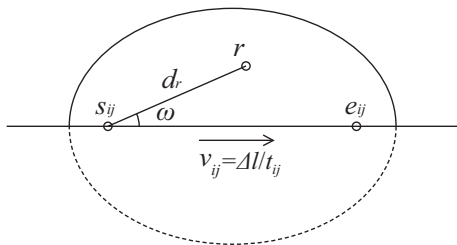


図-6 動的活動領域

ここで、 $V_j$  は  $A_j$  に関する効用の確定項、 $\varepsilon_j$  は誤差項とする。このとき、連続、離散それぞれの選択確率は以下で表される。

$$Pr(t_j) = \left( \frac{1 - \alpha_j}{t_j} + \frac{1 - \alpha_c}{t_c} \right) \frac{1}{\sigma} \exp\left( \frac{-(V'_c - V'_j)}{\sigma} \right) \times \left[ 1 + \exp\left( \frac{-(V'_c - V'_j)}{\sigma} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

$$Pr(A_j) = \frac{\exp(V_j + \gamma V_{c_j})}{\exp(V_j + \beta V_{c_j}) + \sum_{n \neq j} \exp(V_n + \beta V_{c_n})} \quad (5)$$

ここで、 $V'_j$  と  $V'_c$  はそれぞれ  $A_j$  と  $A_c$  に関する効用の確定項を示す。

次に、Habib のモデルと同様に、離散選択モデルと連



続モデルの誤差項の相関を用いて、両モデルの同時確率を求める。誤差項  $\varepsilon_j$  と誤差項  $\varepsilon'_j$  には、計算性を考慮し、ともにガンベル分布を仮定する。その上で、Lee (1983)<sup>13)</sup> に従い、正規分布の逆関数を用いてこれらを同等の標準正規分布に変換し、相関係数  $\rho$  として 2 項正規分布の同時分布関数を適用する。

$$\begin{aligned} Pr(t_j \cap A_j) = & \left( \frac{1 - \alpha_j}{t_j} + \frac{1 - \alpha_c}{t_c} \right) \frac{1}{\sigma} \exp\left( \frac{-(V'_c - V'_j)}{\sigma} \right) \\ & \times \left[ 1 + \exp\left( \frac{-(V'_c - V'_j)}{\sigma} \right) \right]^{-2} \\ & \times \Phi\left( \frac{J_1(\varepsilon_j) - \rho J_2(\varepsilon'_j)}{\sqrt{1 - \rho^2}} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

$\sigma$  はスケールパラメータ、 $J_1(\varepsilon_j)$  と  $J_2(\varepsilon'_j)$  は変換後の標準正規分布関数を示す。

#### 4. プロブパーソンデータ

以上のようなモデリングに対応したデータとして、プロブパーソン (PP) 調査データがある。

PP 調査は、携帯電話など GPS 搭載の移動体通信とウェブダイアリーを用いて、人の移動行動を記録する調査である。位置データは秒単位で自動的に記録され、加えて出発地・到着地や出発時間・到着時間は被験者が携帯電話上でボタンを押すことにより記録される。また、移動目的、目的施設、交通手段等の情報を、ウェブダイアリーを用いて被験者が入力することにより取得する。

PP 調査の特徴の一つとして、個人ごとの移動に関する精度の高い位置・時刻データが得られることが挙げられる。位置・時刻の詳細な変化が観測できることにより、本研究で提示するようなモデルの適用を容易に行うことができる。

#### 5. まとめ

本研究では、時間制約下での動的活動領域に基づく歩行者の時空間利用に関する逐次的な選択モデルを構築し、その理論的フレームを提示した。本モデルを用いることにより、予め設定したリンクやゾーンを用いずに空間特性を分析することが可能になる。エージェントベースのシミュレーションを通じて、歩行者による空間利用の頻度に加えて、空間に対する時間配分量の分布を得ることができ、都市の空間計画にとって有益な情報を提供できる。

今後、実際に取得された歩行者行動のプロブパーソン調査データを用いて、モデルのパラメータ推定を行い、歩行者の時空間利用の分布に関するシミュレーションを行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 竹上直也, 塚口博司: 空間的的定位に基づいた歩行者の経路選択行動モデルの構築, 土木学会論文集, Vol.62, No1, pp. 64-73, 2006.
- 2) Guo, Z., Loo, B. P. Y.: Pedestrian environment and route choice: evidence from New York City and Hong Kong, *Journal of Transport Geography*, Vol. 28, pp. 124-136, 2013.
- 3) Fosgerau, M., Frejinger, E., Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B*, Vol. 56, pp. 70-80, 2013.
- 4) 伊藤創太, 羽藤英二: 時空間状の遷移確率に基づく歩行者流配分モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 48, CD-R, 2013.
- 5) Hoogendoorn, S. P., Bovy, P.: Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp. 169-190, 2004.
- 6) Bellman, R.: *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, 1957.
- 7) Blue, V. J., Adler, J. L.: Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 293-312, 2001.
- 8) Guo, R.Y., Huang, H.J., Wong, S.C.: Collection, spillback, and dissipation in pedestrian evacuation: A network-based method. *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 490-506, 2011.
- 9) Bhat, C., Guo, J.: A mixed spatially correlated logit model: formulation and application to residential choice modeling. *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp. 147-168, 2004.
- 10) Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M.: Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 667-687, 2006.
- 11) Habib, K. M. N.: A random utility maximization (RUM) based dynamic activity scheduling model: Application in weekend activity scheduling. *Transportation*, Vol. 38, pp. 123-151, 2011.
- 12) Bhat, C.R.: The multiple Discrete-Continuous Extreme Value (MDCEV) model: Role of utility function parameters, identification considerations, and model extensions. *Transportation Research Part B*, Vol. 42, pp. 274-303, 2008.
- 13) Lee, L.F.: Generalized econometric models of selectivity. *Econometrica*, Vol. 51, pp. 507-512, 1983.

(2016. 4. 22 受付)