

# 異質性と空間相関を考慮した Plan-Action 型歩行者挙動モデルの改良

内田 翔太<sup>1</sup>・柳沼 秀樹<sup>2</sup>・寺部 慎太郎<sup>3</sup>・田中 皓介<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程

(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641) E-mail:7620502@ed.tus.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: yaginuma@rs.n.tus.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: terabe@rs.tus.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: tanaka.k@rs.tus.ac.jp

近年、交通結接点を対象とした拠点整備が活発化しており、歩行空間の質的な向上が求められている。歩行空間の設計に当たっては、経路や混雑箇所等の詳細な歩行行動を加味する必要があり、より高精度な歩行者挙動モデルの構築が求められる。本研究では、歩行者挙動モデルの一種であるPlan-Actionを考慮した離散選択型歩行者挙動モデルの性能改善を試みる。Plan-actionモデルでは、Actionモデルではミクロな1歩1歩の歩行者挙動を歩行空間選択として表現し、Planモデルでは改札などの短期的な目的地選択を記述し、両者の同時選択によってミクロな歩行者挙動を表現している。歩行者行動データに基づくパラメタリゼーションにより、従来の歩行者挙動モデルと比べて高い記述力と解釈可能性を有しているが、個人の異質性や選択肢間の相関が十分に表現できていないため、Plan-ActionモデルにMXLとCNLを導入することで、さらなる記述力の向上を目指す。

**Key Words :** *Pedestrian behavior model, Plan-Action Model, Personal heterogeneity, Correlation structure between choices*

## 1. はじめに

歩行行動は、日常生活において必然的に行われる交通行動であり、多くの分野で多角的に研究が行われている。特に、土木工学分野ではミクロな歩行挙動の分析が歩行空間設計に寄与するとして、歩行者挙動モデルの開発が行われてきた。近年、駅空間のリノベーションを含めた局所的な拠点再開発が活発化しており、より良い空間評価に向けた精度の高い歩行者挙動モデルの構築が求められている。

本研究の目的は、駅構内などの歩行空間の設計に資するより精度の高い歩行者挙動モデルを構築することである。本研究では、歩行者の目的地選択と個人の異質性に着目した。これまで既存の研究では目的地を既知のものとして外生的に設定し、経路選択のみに着目したものがほとんどであった。というのも、目的地選択は歩行中に

周囲の環境に応じて動的に変化するものであり、さらにその変化は直接観測不可能だからである。また、個人の行動は習慣や嗜好などにより差異が出てくる。この異質性を考慮することはモデルの精度を向上させる為に不可欠であるため、本研究では異質性も考慮する。

以上の点を踏まえ、本研究では動的な目的地選択を明示的に考慮した歩行者挙動モデルを実データに基づいて構築する。具体的には、行動の「計画 (Plan)」と「行為 (Action)」という二つの異なる側面の総合関係を考慮した Plan-Action Model に基づいて、歩行者挙動モデルの構築を行う。

本研究の目的は、駅構内などの歩行空間の設計に資するより精度の高い歩行者挙動モデルを構築することである。本研究の先行研究である瀬尾<sup>1)</sup>は、歩行者の目的地選択に着目した。これまで既存の研究では目的地を既知のものとして外生的に設定し、経路選択のみに着目した

ものがほとんどであった。というのも、目的地選択は歩行中に周囲の環境に応じて動的に変化するものであり、さらにその変化は直接観測不可能だからである。そこで、瀬尾<sup>1)</sup>は動的な目的地選択を明示的に考慮した歩行者挙動モデルを実データに基づいて構築した。具体的には、行動の「計画 (Plan)」と「行為 (Action)」という二つの異なる側面の総合関係を考慮した Plan-Action Model に基づいて、歩行者挙動モデルの構築を行った。しかし、瀬尾<sup>1)</sup>の研究では、選択肢の相関関係と個人の異質性の考慮に欠くという課題があった。前者に関して、歩行者は挙動選択の際、当該選択肢と隣接する選択肢の近接性を考慮しているはずであり、空間的な相関を記述する必要がある。また、後者に関して、個人の行動は習慣や嗜好などにより差異が出てくる。これら相関性や異質性を考慮することはモデルの精度を向上させる為に不可欠である。

以上の点を踏まえ、本研究では選択肢の相関関係と個人の異質性に着目する。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

### (1) 離散選択モデルに基づく歩行者挙動分析

本研究は、柳沼<sup>2)</sup>および瀬尾<sup>1)</sup>の後続研究であり、多くの手法においてこの論文を参考としている。本節では、柳沼<sup>2)</sup>、瀬尾<sup>1)</sup>の手法と成果について簡単にまとめる。

柳沼<sup>2)</sup>は、Antonini<sup>4)</sup>の研究を踏まえて、歩行者の視認性を考慮したモデリングとバリデーションを行っている。このとき推定には、柳沼<sup>3)</sup>に準拠し、Cross Nested Logit (以下CNL) モデルを用いた。選択肢となる移動先は角度7個、速度3個の組み合わせで計21個 (図-1) とし、角度変化大、小、加速、等速、減速の5つのネストを定義することにより離散空間上の選択行動をモデル化している。構築した歩行者挙動モデルについて修正尤度比の平均は非常に高く、有効な歩行者モデルの構築に成功したと言える。

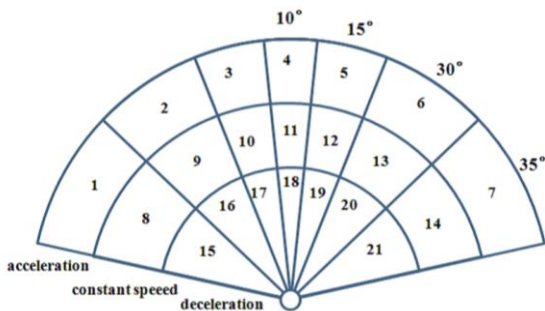


図-1 選択肢集合(柳沼(2011)より)

瀬尾<sup>1)</sup>は、柳沼<sup>2)</sup>の研究に欠けていた目的地選択を、Plan-Action Modelに基づいてモデル構築を行うことにより内生化している。このとき、構築したモデルに基づいた歩行者挙動シミュレータを開発し、そのシミュレーション結果がAction選択、Plan選択ともに実際とよく類似していることを確認し、このアプローチによる歩行者挙動モデルは実際の歩行者空間設計に資するものだと示した。

### (2) 本研究の位置づけ

本研究の目的は、駅構内などの歩行空間の設計を助けるようなより精度の高い歩行者挙動モデルを構築することである。本研究は瀬尾<sup>1)</sup>の後続研究であるため、瀬尾の Plan-Action Model を歩行者挙動モデルに組み込むことにより目的地を考慮したモデルを構築する。このとき、瀬尾<sup>1)</sup>の研究に欠けている選択肢の相関関係と個人の異質性を新たに考慮する。

瀬尾<sup>1)</sup>の Plan-Action Model はMNLを使用しているため、IIA 特性の問題が生じる。そこで、本研究では、柳沼<sup>3)</sup>に準拠して経路選択にCNLの形を組み込んだモデルを構築する。具体的には、加速度で加速、等速、減速の3つ、そして角度で外角、内角の2つ、合計で5つのネストを定義する。また、個人の異質性を考慮するため、同じく経路選択にMXLの形を組み込んだモデルを構築し、モデルの精度の向上を目指す。ここで、モデルの構築にあたって、本研究では駅構内の改札付近における歩行者の挙動を対象とする。というのも、改札付近の経路選択はまさに混雑解消のためにモデル化する意義が高

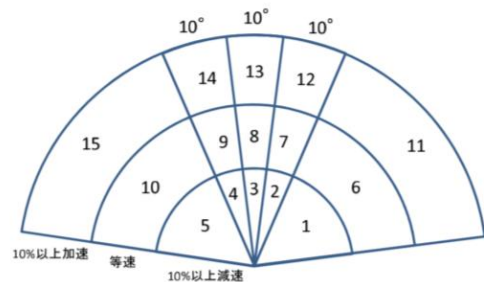


図-2 歩行空間選択肢集合



図-3 目的地選択肢集合

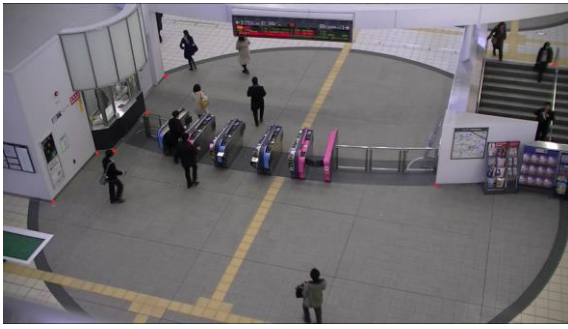


図-4 歩行空間選択肢集合

いからである。

### 3. 歩行者挙動データの基礎集計

#### (1) データの概要

本研究で利用するデータは、東急たまプラーザ駅構内の改札付近の監視カメラ画像を瀬尾ら<sup>1)</sup>が解析したことによって得られた挙動データである。これらの歩行者から 0.5 秒間隔で挙動データを取得した。

- 解析対象時間：200 秒
- 総挙動データ数：1740
- 解析対象人数：219 人
- 駅ホームへ向かう歩行者数：188 人，同サンプル数 1446
- 駅から出ていく歩行者数：31 人，同サンプル数 294

#### (2) データの基礎集計結果

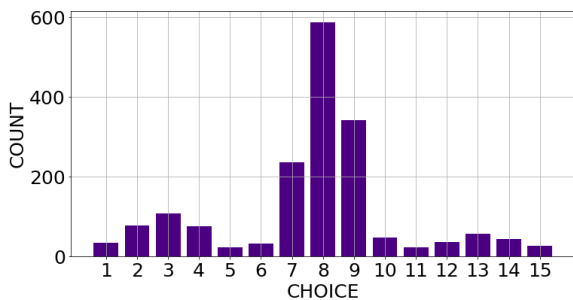


図-5 移動先選択回数

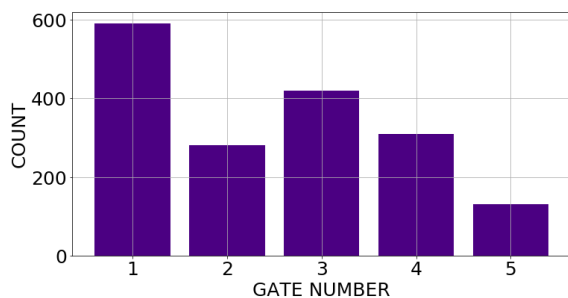


図-6 5つの改札の選択

Action 選択における歩行者挙動モデルは、歩行者が 0.5s ごとに自身の移動先となる空間を選択すると想定し、移動先となる選択肢は角度と速度によって 15 個のメッシュに離散化する (図 2)。図 5 の選択肢別の集計結果より、直進が多く見られるが、選択肢 7 と 8 を比較より、左よりの角度選択をとる人が多い。これは、この駅の構造が左折を起ししやすい構造であるからと推測される。

改札を左から 1~5 と番号を付ける (図 3)。このうち改札 5 は駅から出る方向のみの一方通行改札である。図 6 より改札 1 の利用人数が他の改札と比べて明らかに多い。前述と同じく駅の構造上左折回数が多くなるからだと考えられる。また改札 5 の利用が極端に少ないのは、本データでは駅から出る歩行者が少ないためである。

### 4. 離散選択型歩行者挙動モデルの構築

#### (1) モデルのコンセプト

本研究では、経路選択に CNL の形を組み込んだモデルを構築する。具体的には、加速度で加速、等速、減速の 3 つ、そして角度で外角、内角の 2 つ、合計で 5 つのネストを定義する。また、個人の異質性を考慮するため、目的地選択に MXL の形を組み込んだモデルを構築し、モデルの精度の向上を目指す。

ここで、モデルの構築にあたって、本研究では先のたまプラーザ駅構内の改札付近における歩行者の挙動を対象とする。というのも、改札付近の経路選択はまさに混雑解消のためにモデル化する意義が高いからであるからである。

#### (2) モデルの定式化

本章では、Plan-Action を援用した歩行者挙動モデルを定式化する。個人の異質性と選択肢間の相関構造を示すために Plan 選択モデルに Mixed Logit Model (MXL)、Action

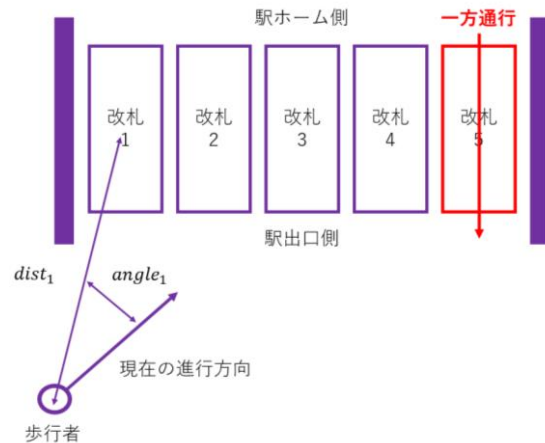


図-7 改札までの距離と偏角

選択モデルに Cross Nested Logit Model(CNL)を用いた。

なお, MXL の推定にはハルトン数列法を用いた。

まず, Plan 選択モデルにおいて考慮した行動要因は以下の 4 点である。

1. 距離の近い改札に向かう傾向がある。また, 進行方向から逸れた改札には向かわない
2. 混雑している改札を避ける
3. 一方通行の改札がある
4. 個人の異質性

個人間で改札選択の嗜好性が異なると考え, Plan の効用関数を式 1 で設定する。ここで,  $\sigma$  が分散項,  $\eta$  は乱数である。

$$V_{plan}(i) = \beta_{gap} dist_i \Delta_{angle} i + (\beta_{congestion} + \sigma \eta) congestion_i + I_{out} \beta_{oneway} \quad (1)$$

よって 5 つの改札から使用する改札  $i$  を選択する際 Plan( $i$ ) の選択確率は以下の通りである。

$$P_{plan}(i) = \frac{\exp(V_{plan}(i))}{\sum_{i=1}^5 \exp(V_{plan}(i))} \quad (2)$$

次に, Action 選択モデルにおいて考慮した行動要因は以下の 6 個である。

1. 目的地に向かう
2. 角度変化を避ける
3. 速度変化を嫌う
4. 障害物を避ける
5. 先行歩行者を追従・追跡する
6. 対向歩行者を避ける

以上を考慮して, 各選択肢の効用は以下のように定式化できる。Action 選択モデルの効用関数は加速段階によってパラメータを分割した。

$$V_{action}(j|i) = \beta_{dist} dist_j^i + I_{angle,normal} \beta_{angle,normal} + I_{angle,extreme} \beta_{angle,extreme} + I_{acc} \beta_{v,acc} \left(\frac{v}{v_{max}}\right)^{2.42} + I_{dec} \beta_{v,dec} \left(\frac{v}{v_{max}}\right)^{2.42} + \beta_{wall} wall_{dist_j} + I_{acc} \beta_{leader,acc} leader_{dist_i} + I_{const} \beta_{leader,const} leader_{dist_i} + I_{acc} \beta_{collider,acc} collider_{dist_i} + I_{const} \beta_{collider,const} collider_{dist_i} + I_{dec} \beta_{collider,dec} collider_{dist_i} \quad (3)$$

よって, Plan( $i$ ) のもとでの Action( $i$ ) の選択確率は以下の通りである。

$$P_{action}(j|i) = \frac{\left(\sum_k (\alpha_{nk} e^{V_k})^{1/\mu}\right)^\mu (\alpha_{nk} e^{V_k})^{1/\mu}}{\sum_l \left(\sum_k (\alpha_{lk} e^{V_k})^{1/\mu}\right)^\mu \sum_k (\alpha_{nk} e^{V_k})^{1/\mu}} \quad (4)$$

以上より, 時刻  $t$  において個人  $n$  が Action  $j_t$  を選択する確率は下記の通りである。

$$P_n(j_t) = \sum_{i_t=1}^I (P_{plan}(i_t) P_{action}(j_t|i_t)) \quad (5)$$

また, 全サンプルにおけるシミュレーション対数尤度は以下のように定式化できる。

$$L = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \ln \sum_{i_t=1}^5 P_{plan}(i_t) P_{action}(j_t|i_t) \quad (6)$$

ここで,  $R$  は繰り返し計算回数である。

### (3) 推定結果

ここまでは, Plan-Action を考慮したモデルを構築した。推定結果を表 1 に示す。推定結果は紙面の都合上, 各変数のパラメータは最も精度が良かった MNL/CNL (plan: MNL, action: CNL) のみ掲載し, 基本的には精度の比較を検証する。

MXL/MNL (plan: MXL, action: MNL) の修正済み尤度比は 0.191 となり, MNL/MNL の 0.199 と比較して適合

表-1 各モデル形式における推定概要の比較

モデルの形式(Plan/Action)	MXL/MNL	MXL/CNL	MNL/MNL	MNL/CNL
推定された係数の数	15	19	14	18
サンプル数	1740	1740	1740	1740
尤度比	0.191	0.200	0.202	0.202
修正済み尤度比	0.191	0.199	0.199	0.201

表-2 推定されたパラメータ(MNL/CNL)

変数	変数値	t 値
$\beta_{angle,normal}$	1.982	8.313
$\beta_{angle,extreme}$	2.610	9.217
$\beta_{dist}$	-0.362	-3.332
$\beta_{wall}$	4.434	4.337
$\beta_{v,acc}$	-4.942	-4.274
$\beta_{v,dec}$	-3.018	-2.999
$\beta_{leader,acc}$	-7.848	-4.149
$\beta_{leader,const}$	4.095	3.745
$\beta_{collider,acc}$	0.026	-0.050
$\beta_{collider,const}$	1.561	0.522
$\beta_{collider,dec}$	-0.024	-0.161
$\beta_{gap}$	0.821	-1.965
$\beta_{congestion}$	0.509	-1.201
$\beta_{oneway}$	0.539	0.232
$\mu_{extreme}$	2.771	3.823
$\mu_{normal}$	3.216	5.149
$\mu_{dec}$	0.952	0.102
$\mu_{acc}$	1.008	0.366

度は低下している。これは Plan 選択における個人の異質性による違いはないためと考えられる。一方、MXL/CNL の修正済み尤度比は 0.199 であり、MXL/MNL と比べると改善している。くわえて、MNL/CNL の修正済み尤度比は 0.201 となり、MNL/MNL と比べると改善している。このことから、選択肢間の相関を考慮すると精度の向上が確認された。

次に MNL/CNL (plan: MNL, action: CNL) のパラメータについて表-2 を基に簡単に考察する。追従性を示す  $\beta_{leader,acc}$  と  $\beta_{leader,const}$  は共に高い t 値を示した。その一方で対向歩行者の回避を示す t 値が軒並み低くなった。これは、駅の構造上ある程度歩行者の動線が決まっていたため、経路選択における対向歩行者の影響が小さいからではないかと考えられる。また  $\beta_{v,acc}$  と  $\beta_{v,dec}$  について考えると、いずれもパラメータ値は高く信頼性が高くなったのだが、 $\beta_{v,acc}$  は仮説の通り符号が負になった一方で、 $\beta_{v,dec}$  は仮説に反して符号が負となった。これは、たまプラーザ駅という実環境に対し、電車に間に合わせる等の諸事情がある歩行者は多少の障害物等が存在しても走り続けるからではないかと考えられる。

## 5. おわりに

### (1) 本研究の結論

本研究では、まず、歩行者の潜在的な目的地選択を Plan-Action Model を用いて明示的に考慮するモデルを構築した。そして、東急田園都市線たまプラーザ駅の改札付近における歩行者流動データを用いてモデルパラメータを推定するにあたって、本研究では Plan 選択モデルに MXL、Action 選択モデルに CNL を用いて組み合わせることで個人の異質性や選択肢間の相関を確認しようと試みた。結果として CNL を組み込んだモデルで尤度比の上昇が認められ、選択肢間の相関を考慮することがモデルの精度向上に繋がることを確認できた。一方、MXL を組み込んだモデルでは尤度比の向上が認められなかったことから、改札の選択においては、個人の異質性による選択の違いはないと言える。

### (1) 今後の課題

本研究では Action 選択モデルに CNL を用いたが、計算コストを削減するためにアロケーションパラメータを全て 0.5 として推定した。今後はアロケーションパラメータも推定対象に入れ、本研究との計算コストやパラメータ推定値などの比較なども行っていきたい。

本研究の先行研究である瀬尾<sup>1)</sup>の研究では、待ち行列や歩行者の停止を課題としていた。本研究ではそれらの課題を取り組むに至らなかったため、今後はこれらも考慮に入れていきたい。

個人異質性については、Plan 選択における異質性に焦点を当てたが、今後は、Action 選択の異質性にもより着目し、精緻な歩行者挙動モデルの構築を進めていく。具体的には、今回の研究では Action 選択モデルは最も尤度比が高く出た  $\beta_{wall}$  に分散項を用いた MXL のみを提示したが、尤度比が低く出た代替案の MXL の考察を詳細まで行わなかったため、それぞれのパラメータに分散項を加えた時のパラメータ値の比較なども行っていきたい。

### 参考文献

- 1) 瀬尾亨, 柳沼秀樹, 福田大輔: Plan-Action 構造を考慮した歩行者挙動モデリングとその適用 - 駅改札付近を対象として -, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.5 (土木計画学研究・論文集第 29 巻), I\_679-I\_690, 2012.
- 2) 柳沼秀樹, 福田大輔, 山田薫, 松山宣弘: 離散選択型歩行者挙動モデル推定のための歩行者座標の自動抽出に関する基礎的研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.67, No. 5, pp. 1787-1800, 2011.
- 3) 柳沼秀樹, 松山宣弘, 福田大輔: 障害物の視認性を考慮した離散選択型歩行者挙動モデルの構築, 第 30 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 437-448, 2010.
- 4) Antonini, G., M. Bierlaire, and M. Weber: Discrete choice models of pedestrian walking behavior, Transportation

- Research Part B: Methodological, Vol. 40, No. 8, pp. 667–687, 2006
- 5) Robin, T., G. Antonini, M. Bierlaire, and J. Cruz: Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 1, pp. 36–56, 2009
- 6) P. Vovsha: Application of Cross-Nested Logit Model to Mode Choice in Tel Aviv, Israel, Metropolitan Area: *Transportation Research Record*, Vol. 1607, pp. 6-15.
- 7) McFadden, D, and Train, K: Mixed MNL models of discrete choice, working paper, Dept. of Economics, University of California, Berkeley, 1997.
- 8) Ben-Akiva, M., Bulduc, D. and Bradley, M: Estimation of travel choice models with randomly distribution values of time, *TRR*, 1413, pp. 88-97, 1993
- 9) Choudhury, C.: Modeling driving decisions with latent plans, Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2007

(Received October 1, 2020)  
(?)

## CONSTRUCTION OF PEDESTRIAN BEHAVIOR MODEL WITH DISCRETE CHOICE FOR STATION SPACES

Shota UCHIDA, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE and Kosuke TANAKA

The behavior of walking is an inevitable behavior in daily life, and it is necessary to construct more accurate pedestrian behavior models. In this study, we adopted the concept of Plan-Action. We attempted to confirm the heterogeneity of individuals and the correlation between alternatives with parameters by combining MXL, MNL with Plan selection model and CNL, MNL with Action selection model. However, as a result, MNL had the highest likelihood ratio. Therefore, in the Plan-Action Model, it can be said that there is no difference between choices due to correlation between options or heterogeneity of individuals.