

街路景観および空間特性を考慮した 歩行者経路選択モデルの構築

木崎 礼雄¹・柳沼 秀樹²・寺部 慎太郎³・海野 遥香⁴・鈴木 雄⁵

¹学生非会員 東京理科大学大学院 創域理工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7619032@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学准教授 創域理工学部社会基盤工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 東京理科大学教授 創域理工学部社会基盤工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

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

⁴正会員 東京理科大学助教 創域理工学部社会基盤工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

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

⁵正会員 東京理科大学助教 創域理工学部社会基盤工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

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

都市部における再開発の活発化や少子高齢化社会の進展に伴い、マイカーに頼らず公共交通機関や徒歩で暮らせる街が注目されている。このような都市を実現するために、歩行者にとって快適で歩きたくなるような街路空間の整備が必要である。しかしながら、歩行者のミクロな行動の把握と街路景観を評価することは未だ困難である。そこで、本研究では街路景観が歩行者の経路選択行動へ及ぼす影響を評価できるモデルを構築することを目的とする。具体的には画像解析技術である Segmentation を導入することによって、街路景観を構成する要素を表現するとともに、経路選択モデルの効用関数に導入した。また、本研究によって、地域特有の街路特性について定量的に把握することが可能になったと言える。

Key Words: *streetscape, pedestrian, route choice behavior, panoptic segmentation*

1. はじめに

近年、都市部において駅空間のリノベーションや都市空間の再開発が活発に行われており、住宅、職場、店舗、病院などの生活に必要な機能を都市の中心部に集約するような計画が進められている。このような都市計画はコンパクトシティと呼ばれ、マイカーに頼らず公共交通機関や徒歩で暮らせる街を目指して注目を集めている。また、人口減少や少子高齢化社会の進展に伴い、健康医療福祉の面からも徒歩に着目した都市施策への関心は高く、歩行者にとって快適で歩きたくなるような街路空間の整備が必要とされている。

しかしながら、歩行者のミクロな行動の把握と街路景観を詳細に評価することは難しく、また施設のみに着目した把握に留まっている。その解決の一助として、歩行者移動軌跡から街路景観を評価することによって歩行空間をより魅力的にすることができる。したがって、都市空間および歩行空間を整備する際には、歩行者の経路選択行動や街路景観といった特性を理解することが非常に重要である。

そこで本研究では、画像解析技術を利用した景観特徴量分析に焦点を当て、街路景観が歩行者の経路選択行動へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。景

観要素をより詳細に評価することで歩行者交通行動の説明力向上が期待される。

2. 既往研究と本研究の位置付け

歩行者の経路選択行動に関する研究はこれまでも多く取り組まれている。歩行者行動データを元にした経路選択モデルの構築に関して、大山、羽藤¹⁾は住宅地図やプローブパーソン調査を用いて、交差点ごとに連続する歩行者の目的別にみた経路選択行動を逐次的な意思決定モデルにより構築している。歩行している街路景観と類似性が高い街路が選択されているという結果を示し、景観の連続性が重視されることを明らかにした。さらに、逐次的な経路選択を継続させ面的な回遊行動を引き出せる可能性があることを述べている。

竹内²⁾は地域住民に対して、街路環境評価の実態を調査すると共に、歩行者経路を調査し最短経路との比較において歩行者がよく使用する街路の抽出を試みている。街路評価に関しては、自動車交通量の少なく街路幅員が広い、天空率が大きく、環境の緑が多いほど、人々はいい街路であると判断していることが示されている。人々は快適さのある道路を「良い道路」としては評価しているものの、経路選択モデルの説明力不足

による街路選択行動の解釈は不十分な段階に留まっている。

経路選択モデルの説明変数として使用する景観要素を容易かつ均質に取得する方法として、福住³⁾は複数の画像認識技術を活用した手法を提示した。下町やニュータウンといった異なる市街地における植生分布を実際に抽出し特徴量の比較を行っている。撮影画像には Semantic Segmentation を用いて画素単位での物体検出と識別、分類を行い、撮影画像には景観要素の 3次元点群を作成し、3次元空間上に配置した。そして、根津、月島、鶴牧、牛久保、神楽坂の 5 地点に置いて、景観要素の一つである植生に注目し定量的な分析を行った。植生の有無のみではなく、植生の単位敷地面積当たりの植生の体積を用いて分析を行うことで、地域ごとの景観の特徴の違いをより詳細に示した。

以上を踏まえて本研究では、画像解析技術の一つである Segmentation を用いて、景観構成要素を画像のピクセル単位で捉え、景観特徴量として抽出する。そして、面積として表される景観特徴量をモデルの説明変数に導入することで、これまでになかった新しい視点で経路選択モデルを構築する。

3. データ概要

(1) 歩行者行動データ

本研究では、2021 年プローブパーソントリップ調査 (PP データ) を用いて歩行者行動分析を行う。PP データは携帯電話等の GPS 機能を用いて正確な座標データを収集するため、パーソントリップ調査 (PT データ) より細かい人口流動の様子を把握することができる。

分析は豊洲地区を対象としてモデルを構築する。また移動目的のうち、「通勤」「通学」などの歩行景観を意識しないと考える義務的な活動を分析対象から除外し、「私事」や「買い物」、「観光」などの活動を分析対象とした。

(2) 景観特徴量

経路選択モデルに景観特性を導入することを目的として、画像解析技術を用いて景観特徴量の抽出を行った。以下に抽出手法の概要と抽出結果について示す。

a) Segmentation の概要

Segmentation とは、機械学習において画像を複数のオブジェクトに分割する技術のことである。この分野の技術は自動運転や顔認証といった用途で使用されており、車両、歩行者、歩道、道路、街並みなどの特徴を識別するために、それらのセグメントを学習している

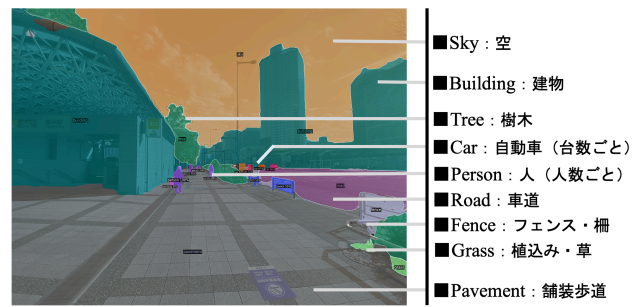


図-1 Panoptic Segmentation による画像解析結果

モデルが多く存在する。本研究では、DeepLearning の一種で、画像内のピクセル (画素) 一つ一つに対してラベルやカテゴリを関連付ける Panoptic Segmentation を用いる。この技術により、景観特徴量として空や道路、建物などの不定形の領域を検出しつつ、人や車といった個別領域の設定を行うことで、景観情報をより詳細まで収集し特徴を把握することができる。

b) 経路写真撮影

先行研究では、Google Street View を用いて、リンクデータを取得することが多い。この手法は非常に手軽であり、コスト、所要時間の面で容易である。しかし、Google Street View の課題点として、撮影された時期が不明瞭であること、幅員の狭い歩行者街路の詳細までは把握できないこと、画像の歪みがあることなどが挙げられる。そこで本研究では、実際の歩行者が見ている街路景観の情報をより精度高く抽出するために、豊洲内の 556 リンクを分析対象とし、スマートフォンのカメラ (iPhone12) を用いて実際の歩行者街路景観の撮影を行う。

c) 特徴量の抽出

撮影した画像を元に景観特徴量の抽出を行う。また、公開されている学習済みモデルで、PyTorch ベースの物体検出ライブラリである Detectron2⁴⁾ を使用し、物体検出と特徴量の抽出を行った。このモデルは学習した 116 種類の物体に対して、精度高く高速で識別することができるライブラリである。

d) 特徴量のデータ化

今回の分析では、景観特徴量として、9つのセグメントのデータ化を行う。また、実際のセグメント分けされた実行結果を図-1に示す。特徴量は画像の中でカテゴリ分けされたピクセル数が算出される。

4. 経路選択モデルの構築

本研究では、歩行者の経路選択行動を記述する Recursive Logit model (RL) を構築する。モデルの説明変数として豊洲地区の街路における景観特徴量を用いる。このモデルにより、街路景観が歩行者の経路選択に及ぼす影響度合いをパラメータ推定により評価する。以下に概要を示す。

(1) モデルの定式化

街路空間において、全ての経路を列挙することは困難であるため、本研究では、経路列挙の不要な逐次的にリンクを選択する RL モデルを用いて経路選択モデルを構築する。リンク k からリンク a に進む選択確率は以下の式 (1) で表す。

$$P_n^d(a|k) = \frac{\exp(\frac{1}{\mu}\nu(a|k) + V_n^d(a))}{\sum_{a' \in A(k)} \frac{1}{\mu}\nu(a'|k) + V_n^d(a')} \quad (1)$$

ここで $\nu(a|k)$ は瞬時の効用、 $V_n^d(a)$ は価値関数、 $P_n^d(a|k)$ はリンクの選択確率である。

本研究では、時間割引率⁵⁾を導入することによって、将来価値の低減、未来に対する不確実性や近視眼的な選択を表す。遷移効用に対する期待最大効用の評価の重みを時間評価の割引率 β として定義し、 $\beta = 0.8$ として RL モデルに導入する。式 (1) は式 (2) で表される。

$$P_n^d(a|k) = \frac{\exp(\frac{1}{\mu}\nu(a|k) + \beta V_n^d(a))}{\sum_{a' \in A(k)} \frac{1}{\mu}\nu(a'|k) + V_n^d(a')} \quad (2)$$

また、時間割引率を導入した経路選択モデルのパラメータ推定は最尤推定法によって価値関数を固定し、対数尤度関数を最大化することによって求められる。対数尤度関数 LL は以下の式 (3) によって表される。

$$LL = \delta_{in} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{J_n-1} \frac{1}{\mu} (\nu_n(a|k) + \beta V_n^d(a) - V_n^d(k)) \quad (3)$$

N はサンプル数、 J_n は経路選択肢集合、 δ_{in} は個人 n が経路 i を選択した場合 1、そうでない場合 0 とするダミー変数である。

5. 推定結果

(1) モデルの精度

推定結果を表-1 に示す。修正済み尤度比は 0.2 を下回ったためモデルの適合度は若干低い。しかし、全ての説明変数において有意な結果が得られた。

表-1 推定結果

| 分類 | 説明変数 | パラメータ | t値 |
|-------------------------|-----------------------|--------|----------|
| 基本情報 | Length (経路長) | -0.718 | -19.6 ** |
| | Width (幅員) | 0.0515 | 2.69 ** |
| 経路写真データ | Shop_Dummy (商店ダミー) | 0.160 | 7.51 ** |
| | Sky (空) | -0.210 | -4.68 ** |
| Segmentation (静的) | Tree (樹木) | -0.101 | -5.29 ** |
| | Grass (植込み) | -0.453 | -11.4 ** |
| | Building (建物) | -0.257 | -14.3 ** |
| 変換データ | Fence_Dummy (フェンスダミー) | -0.467 | -15.6 ** |
| サンプル数 (Link Transition) | | 3340 | |
| 修正済み尤度比 | | 0.179 | |

** : 1%有意 * : 5%有意

(2) パラメータ推定結果

パラメータ推定結果に関しては、説明変数の Length が負の値、Width と Shop ダミー変数が正の値を取ることから、経路長が短く街路幅員が広い街路かつ商店のある街路ほど選択されるという結果に至った。画像解析により抽出した景観特徴量 (Sky, Tree, Grass, Building) については全て負の値を取り、景観面積が大きいほど経路選択行動へはマイナスに働き直感とは反する結果となった。

6. 主成分による次元圧縮後の推定

前節までの結果を踏まえ、景観特徴量を次元圧縮し解釈可能な景観変数を導入することを目的として、以下の 8 個の変数 (表-2) に対し主成分分析を行う。

表-2 主成分分析で扱う説明変数

| | 説明変数 |
|---|------------|
| 1 | Length |
| 2 | Width |
| 3 | ShopDummy |
| 4 | Sky |
| 5 | Tree |
| 6 | Grass |
| 7 | Building |
| 8 | FenceDummy |

(1) 主成分得点の評価と解釈

採択した主成分 1~5 (PC1~5) について、各主成分得点の結果を評価すると同時に各主成分変数について

表-3 主成分分析の解釈

| 主成分 | 分類 | 主成分解釈 |
|-----|-------|---------------------------|
| PC1 | 閉鎖的 | 樹木が生い茂る 自然豊かな空間 |
| PC2 | やや開放的 | 幅員が大きく、ショップが 見える駅周辺の空間 |
| PC3 | 開放的 | 幅員が大きく、整備された 開放的な空間 |
| PC4 | 閉鎖的 | 建物が立ち並び、 植込みの多い空間 |
| PC5 | 平均的 | 経路は短く、 やや植生のある空間 |

の解釈を行った(表-3)。さらに、主成分を開放的要素と閉鎖的要素に分類した。

(2) 推定結果

説明変数を次元圧縮し、PC1~PC5 を新たな説明変数として推定を行う。その結果を表-4に示す。結果は、モデルの適合度は若干低いものの、全ての説明変数において有意な結果となった。また、大分類である開放的な街路である PC2 と PC3 のパラメータが正であることから、「人々は開放的な街路を選択する」という結果を得られた。

表-4 次元圧縮後の推定結果

| 説明変数 | パラメータ | t 値 | |
|----------------------------|---------|-------|----|
| PC1 | -0.0806 | -2.38 | ** |
| PC2 | 0.226 | 3.51 | ** |
| PC3 | 0.250 | 6.4 | ** |
| PC4 | -0.339 | -5.0 | ** |
| PC5 | 0.397 | 5.14 | ** |
| サンプル数 (Link Transition) | 3340 | | |
| 修正済み尤度比 | 0.170 | | |

**:1%有意 *:5%有意

7. 景観パターン

(1) 景観パターンの可視化

前節で得られた主成分得点を元に、豊洲の街路景観パターンを分類し、可視化することを目的としてクラスター分析(k-means法, ユークリッド距離)を行った。今回は5つのクラスターに分け解釈を行った。その結果を

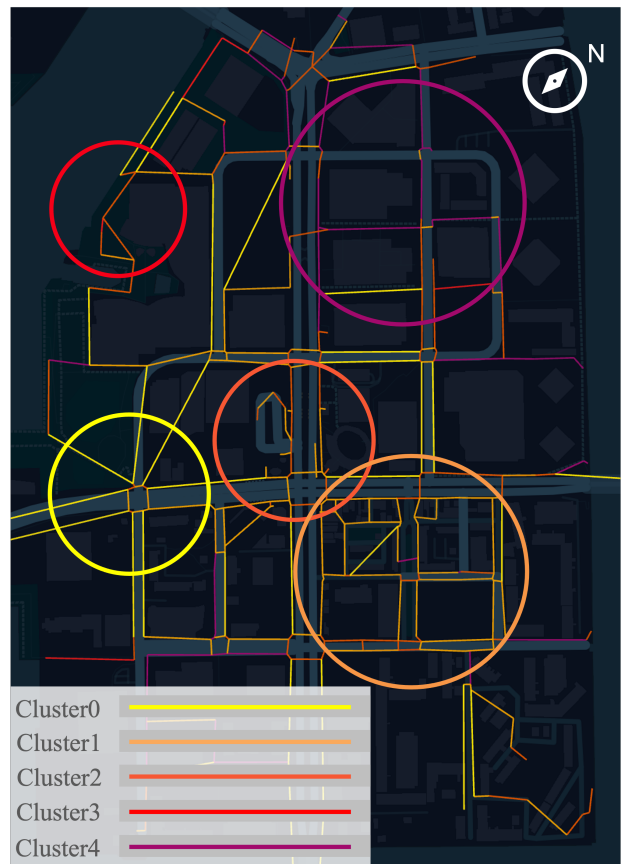


図-2 クラスタ分析による街路景観パターンの分類結果

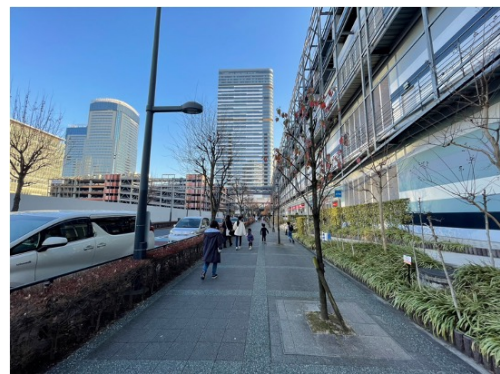


図-3 Cluster0 (ららぽーと豊洲周辺の街路写真)

対象エリアの街路にマッピングしたものを示す(図-2)。

(2) 街路景観特性と経路選択行動

Cluster0(図-3)は主要な幹線道路ではあるが、PC1とPC4の平均値が高いことから、経路長が長く閉鎖的な街路、つまり選択されにくい街路パターンであることがわかった。一方で、Cluster2(図-4)は豊洲駅周辺の街路であり、PC3の平均値が一番高いことから、幅員が大きく整備された開放的な街路、つまり選択されやすい街路パターンであることがわかった。



図-4 Cluster2 (豊洲駅周辺の街路写真)

8. おわりに

本研究では、景観特徴量を連続値で捉え、経路選択モデルによる街路評価手法を確立させることができた。モデル精度の低さといった点で課題は残すものの、画像解析技術である Panoptic Segmentation を導入することによって、離散的な変数ではなく連続量として街路景観を表現することが可能となった。モデルの精度を向上させるためにはサンプル数を増やすことが一例として挙げられる。本研究では、2021年の歩行者PPデータのみを用いたが、他の年度にも使用データを拡張す

ることによってモデルの精度の向上が見込める。また、様々な説明変数（景観特徴量）の組み合わせによって、尤度比とパラメータの値が異なるため、経路選択行動をよく説明している適切な説明変数を抽出することが重要だと考える。

そして、説明変数の次元圧縮後の結果より、豊洲地区では建物や樹木などの閉鎖的な街路は避け、開放的な街路を選択しているということが結論づけられる。つまり、人流を増加させるためには、なるべく建物から歩道までの距離を保つかつ幅員を広く取り、樹木や植込みは視界を遮らないよう道路の隅に設置することが理想だと考える。街路特性と歩行者特性の両視点を合わせた分析を行うことにより、街路景観が歩行者の経路選択行動へ及ぼす影響を明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 大山雄己 and 羽藤英二: 街路景観の連続性を考慮した逐次的経路選択モデル, *都市計画論文集*, Vol.47, No.3, pp.643-648, 2012.
- 2) 竹内伝史: 歩行者の経路選択性向に関する研究, *土木学会論文報告集*, Vol.1977, No.259, pp.91-101, 1977.
- 3) 福住智諒 and 本間裕大: semantic segmentation と dbscan を用いた市街地における景観要素分布の推定, *生産研究*, Vol.72, No.4, pp.309-314, 2020.
- 4) <https://github.com/facebookresearch/detector2>: Detetron2.
- 5) 大山雄己 and 羽藤英二: 一般化rlモデルを用いた災害時の経路選択行動分析, *交通工学論文集*, Vol.3, No.5, pp.1-10, 2017.

(Received June 17, 2022)

(Accepted January 17, 2023)

Construction of Pedestrian Route Selection Model Considering Street Landscape and Spatial Characteristics

Reo KIZAKI, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE, Haruka UNO and Yu SUZUKI

As urban redevelopment becomes more active and the birthrate declines and the population ages, attention is increasingly focused on cities where people can live by public transportation or on foot, rather than relying on their own cars. In order to realize such cities, it is necessary to develop street spaces that are comfortable for pedestrians and make them want to walk. However, it is still difficult to understand the micro-behavior of pedestrians and to evaluate the streetscape. Therefore, the purpose of this study is to construct a model that can evaluate the influence of street scenery on pedestrians' route selection behavior. Specifically, we introduced segmentation, an image analysis technique, to represent the components of the streetscape, and introduced it into the utility function of the route choice model. This research has made it possible to quantitatively understand the characteristics of streets unique to each region.