

令和元年5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18131

研究課題名(和文)統計理論に基づく歩行空間評価指標の開発とその特性分析

研究課題名(英文)Evaluation Method of Pedestrian Facility Based on Spatial Statistics

研究代表者

中西 航(Nakanishi, Wataru)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：70735456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空間統計理論と流量密度関係に基づいた歩行空間評価手法の構築を目的とし、具体的には以下3点の成果を得た。(1)時空間的に高解像度な歩行者軌跡データをスマートフォン内蔵のGPS観測などから取得する際の、軌跡推定および精度評価方法を確立した。(2)対象空間全体を網羅する歩行者軌跡データが存在する場合に、空間相関を考慮して流量密度関係の空間内でのばらつきを導出し可視化する手法を構築した。(3)この手法を長期観測データに適用し、推定結果の安定性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

充実する歩行者挙動のモデルやデータを活用した歩行空間評価手法の構築は必ずしも進展しておらず、歩行空間設計はデザイン領域の問題として交通工学から分断されてきた。本研究成果は、両分野をつなぐ学術的意義を有する。具体的には、横断歩道や駅構内のような大きさの領域を対象に、交通工学の得意とする流量や密度のような統計量の、対象領域内部におけるばらつきを、統計的根拠に基づいて提供する。対象領域内で潜在的に歩行速度や交通量が低下しうる地点を推定可能であるため、安全で快適な歩行空間の実現に向けた社会的意義の大きい研究である。

研究成果の概要(英文)：We construct a pedestrian facility evaluation method based on spatial statistics and flow-density relationship of traffic theory. The following three results were obtained. (1) A pedestrian trajectory estimation and its accuracy evaluation method using spatio-temporally high resolution data from GPS observation by a smartphone was developed. (2) Using these data, the method of deriving and visualizing the fluctuation in the flow-density relationship in the facility was constructed by considering spatial correlation. (3) We applied this method to long-term observation data and confirmed the stability of the estimation results.

研究分野：交通工学

キーワード：歩行空間 交通流 空間相関 観測誤差

1. 研究開始当初の背景

(1)一般的な背景

歩行者挙動シミュレーションモデルの進展や、カメラやGPSなど各種センサを用いた人物追跡手法の進展により、人物挙動に関する高解像度な情報を得やすい環境が整ってきた。たとえば、効用最大化理論に基づくシミュレーションモデルの変数は、速度や進行方向の変更、周辺人物の回避などといった人物挙動の特性およびその感度を表現している。また、センシングにより1cm単位のオーダーで空間内での人物位置も把握できる。このような情報は量的にも質的にも充実してきており、緊急時の避難シミュレーションによる安全確保や、動線解析によるマーケティングへの展開など、様々に応用されはじめています。

一方で、歩行空間の設計に目を向けると、建築・都市分野における「デザインの良さ」と、交通工学的な観点からの「歩行空間評価」は分断されている状況にある。たとえば、交通工学的観点における駅構内の設計では、混雑時の断面交通量を処理可能な幅員確保が行われるのみである。また、その評価においても、人物の平均速度や平均密度のような単純なマクロ指標が用いられるのみである。本来、歩行空間の良さとは、混雑時の歩行者流の効率的な処理ばかりでなく、非常時の超混雑状態における避難時間の最小化、平時の交錯発生回数の低減による安全性・快適性の向上など、様々な観点で議論されるべきであろう。なぜならば、歩行空間は、多くの人々にとって生活の最も基本となる場のひとつであり、良い歩行空間の実現は、良い生活の実現と直結する社会的意義の大きいものだからである。

ゆえに、今後より一層の充実が見込まれる高解像度の人物挙動データを、特定の建物における避難や特定の店舗におけるマーケティングのみならず、より一般的な歩行空間評価に活用することはきわめて重要であろう。しかし残念ながら、これまでのところ、モデルやデータの充実と比較すると、より根源的な歩行空間評価手法は十分に進展しているとはいえない。

(2)これまでの研究との関係

交通工学の一分野としての歩行者挙動分析は、古典物理学や統計力学、流体力学、計量経済学、計算理論など広い学問領域の手法を援用して発展してきた。また、モデル化の対象とする空間スケールによっても異なる手法が発展してきた。

特に空間評価に関係する部分では、a)単純に歩行者密度や断面通行量を計測するもの、b)自動車流のアナロジーとしての流量密度関係(あるいは基本図)を求め分析するもの、c)熟練者が調整したパラメータによるシミュレーションモデルを用い予測するものなどが主たる手法である。それぞれに利点はあるものの、時間・空間的に高解像度なデータを前提とするならば、a)のような地点・時点を限定した計測である必要はない。また、b)のような関係性が時空間的にどのように変化しうるのかを議論することも可能である。そのことが、将来的にc)で用いるモデルの改良や精緻化にも繋がると考えられる。

これらの中でも、特にb)に関係する部分の研究は多様な側面から行われ続けている。様々な関数形が提案され、その適用範囲や空間移転性などの議論も尽きない。しかしながら、基本的には、関数形はデータへの当てはまりの良さから評価されることが多いため、必ずしも統計的根拠に基づいたものとはなっていない。そのため、対象空間で歩行者流に何が起きているかは理解できても、空間そのものの性能評価として普遍的に用いるには不十分な点が残る。そのため、対象空間内における流量密度関係の安定性や偏りなどを評価する手法の構築が望まれる。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、人物挙動に関する数理的議論の整理に基づく歩行空間の評価方法の構築、特に空間統計理論と流量密度関係に基づいた歩行空間評価を行うことを目的に、以下の3点を行う。

- (1) 時空間的に高解像度な歩行者軌跡データをスマートフォン内蔵のGPS観測などから取得する際の、軌跡推定および精度評価方法の確立。
- (2) これにより対象空間全体を網羅する歩行者軌跡データが存在する場合に、空間相関を考慮して流量密度関係の空間内でのばらつきを導出し可視化する手法の構築。
- (3) ここで構築した手法を長期観測データに適用することによる、推定結果の安定性などの分析を通じた手法の特性分析。

1点目は、原理的にはマップマッチングという既往研究が多く存在する分野ではあるが、歩行者に特化したものは必ずしも多くはない。データ取得後の処理がその後のモデル性能を左右する場合があることから、歩行者特有の状況を踏まえたマップマッチング手法について検討する。2点目は、本研究の主眼であり、空間統計理論に基づいて対象空間内の流量密度関係の揺らぎを構造化することにより、潜在的な流率低下可能性のある地点などを特定する手法を構築し、実データに適用する。3点目は、同手法の安定性を長期観測データに適用することにより確認し、特性を分析する。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するため、目的に対応する以下3点の方法を用いる。

(1) 一連のGPS観測値から歩行軌跡を生成する逐次マップマッチング手法の整理と拡張

一般状態空間モデルの枠組みを利用し、歩行者挙動モデルのパラメータ自身をデータ同化手法により逐次推定する方法、GPS観測精度を同様に逐次推定する手法をそれぞれ構築する。また、これらを統合した上で、従来のマップマッチング手法の課題のひとつである、道路が幅を持たないリンクで表現され、移動経路はそのリンク上に限定されるという点を緩和する枠組みに拡張する。この枠組みはきわめて一般的であり、実際の歩行者位置のネットワークからの乖離度、歩行者挙動や計測誤差を確率的モデルとして与えさえすれば、あらゆる状況を自由度高く記述できるものである。

(2) 空間統計理論を用いた歩行空間全体を対象とする流量密度関係のモデル化

自動車流で用いられる流量-密度-速度の関係(あるいは基本図)を歩行者流に対して同様に推定することをベースとする。この際に、基本図が本来的に地点依存であることに留意し、対象空間全体で測定した歩行者流のデータに対して密度-速度関係を推定する際に、その関係が空間内部で局所的に異なりうることを空間相関としてモデル化する方法を検討する。具体的には、固有ベクトル空間フィルタリングと呼ばれる手法を用いて、速度を密度で回帰する通常の基本図の回帰式に空間相関項を組み込んで定式化する。この際に、空間を離散的に区切る方法と連続のまま扱う方法の両者を試行する。推定結果である空間相関は、対象空間内部の最大流率の大小を表す空間パターンと解釈できる。同時に、この空間相関をスケールごとに分類し可視化することも試みる。

(3) 長期観測データに対する構築手法の特性分析

(2)の手法を、複数地点あるいは同一地点での複数日のデータへ適用して、推定結果の安定性を確認する。具体的には、得られる空間パターンの有意性を統計的検定により判定したうえで、その類似性をk-means法やWard法によるクラスタリングで判定する。

4. 研究成果

上記の目的・方法の各点について、以下の成果が得られた。

1点目については、一連のGPS観測値に対して、挙動モデルや観測精度を表すパラメータを逐次推定する手法の構築と性能検証を行った。さらに、道路ネットワークを所与としながらも、歩行者位置をネットワークの真上に限定しない自由度の高い歩行軌跡推定手法の構築を行った(雑誌論文(2)(3)(6)(7)、学会発表(3)(7))。このことにより、必ずしもビデオカメラからの観測を行わなくとも、多くの対象領域において歩行者軌跡データを入手できる可能性を高めたと言える。

2点目については、あらゆる適用において、空間相関を考慮した流量-密度関係の推定が考慮しない場合よりも統計的に優れていることを示すことが出来た。すなわち、網羅的な適用を行ったことにより、空間の離散・連続の扱い方や、データ取得の時間間隔などの設定によらない提案手法の汎用性が明らかとなった。また、速度低下が障害物付近で起きやすいなどの直感に整合的な結果が得られており、空間パターンと実データの照合においても同様の傾向が確認できた。一方で、流動性の低い場所はホームの入り口などの直感的に明らかな場所のみならず、幅の広い通路上においても検出されることから、本研究による手法が潜在的に非効率的空間を発見できる可能性が示唆された。(雑誌論文(4)(5)、学会発表(4)(6)(8))

3点目については、複数地点でのデータへの適用と、同一地点での複数日データへの適用の両者を通して、構築手法の安定性を確認した。前者では、横断歩道および駅構内という性質の異なる二種類の歩行空間において実データとの対照から解釈可能なパラメータ推定結果が得られていることを確認した。後者については、スイス連邦のローザンヌ駅構内で取得された10日間、延べ900分のデータへの適用を行った。具体的には、朝ラッシュ時90分間を10分単位に区切ってそれぞれのデータに対して推定を行った。その結果、同じ時間帯であれば同じような空間パターンを示すこと、すなわち同様の空間評価が行えることを明らかにした。このことは手法の普遍性を担保するだけでなく、元データが大量かつノイズを多く含むものであったとしても、歩行者流の流動性を下げる原因となるエリアを安定して特定可能であることを意味しており、手法の実用性の高さを示している。また、駅構内の東西2か所の通路それぞれで流動性に影響を与える箇所が異なること、およびその原因が実際の歩行者挙動と一定程度関連づけて説明できることを示した。

また、当初想定に加えて、関連する以下の成果も得ることができた。

- 長時間の連続した歩行軌跡から回遊行動を分類し、土地の類似度を可視化する手法論の構築を行った。(雑誌論文(1)、学会発表(1))

- データ取得段階における副産物として、断面歩行者交通量の非定常到着分布を推定する手法を構築した。(学会発表(5))
- 対象空間をより広く捉えた場合の歩行者挙動モデルについても検討を行った。(学会発表(2)(9))
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)およびスイス国鉄(SBB)とのデータ共有や共同研究の足がかりを築いた。

これらはいずれも、研究成果の今後の展開に大きく資する可能性のある結果であろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

- (1) Nakanishi, W.: Understanding and Visualisation of Geographic Mesh Similarity by Trajectory Data and Gaussian Process Modelling, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 査読有, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s13177-018-0171-9>
- (2) 中西航, 布施孝志: ネットワークの誤差を考慮した歩行経路の逐次マップマッチング手法, 統計数理研究所共同研究レポート 406 不確実状況下での動的状態推定と知能情報科学の融合(1), 査読無, pp.97-104, 2018.
- (3) 中西航, 布施孝志: 測位値に基づく歩行経路の逐次推定におけるネットワークの誤差に関する検討, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol. 73, No.5, pp. I_549-I_557, 2017.
https://doi.org/10.2208/jscejipm.73.I_549
- (4) 中西航, 福富義章, 布施孝志: Harmonic Spatial Filtering による歩行者流の密度-速度関係における空間相関のモデル化, 交通工学論文集, 査読有, Vol.3, No.4, pp.A_1-A_6, 2017.
https://doi.org/10.14954/jste.3.4_A_1
- (5) Nakanishi, W., Fukutomi, Y. and Fuse, T.: Spatial fluctuation on speed-density relationship of pedestrian dynamics, Journal of Statistical Mechanics: theory and experiment, 査読有, Vol.2017, No.3, pp.033402, 2017.
<https://doi.org/10.1088/1742-5468/aa60cf>
- (6) 中西航, 布施孝志: ネットワーク上の歩行者移動把握のための衛星測位精度の適応的推定, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol.72, No.5, pp. I_673-I_681, 2016.
https://doi.org/10.2208/jscejipm.72.I_673
- (7) 中西航, 高橋真美, 布施孝志: 歩行者挙動モデルのパラメータ推定への一般状態空間モデルの適用, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol.71, No.5, pp. I_559-I_566, 2015.
https://doi.org/10.2208/jscejipm.71.I_559

[学会発表](計9件)

- (1) 中西航: ガウス過程を用いた移動軌跡に基づくメッシュ類似度の把握と可視化, 第16回 ITS シンポジウム 2018, 同志社大学, 京都府京都市, 2018.12.14.
- (2) 力石真, 中西航, 瀬谷創: Link as an aggregate alternative: a continuous recursive logit representation of pedestrian behavior, 第58回土木計画学研究発表会(秋大会), 大分大学, 大分県大分市, 2018.11.25.
- (3) Nakanishi, W. and Fuse, T.: Network-Based Continuous Space Representation for Describing Pedestrian Movement in High Resolution, The 9th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Lund, Sweden, 2018.08.23.
- (4) Nakanishi, W., Fukutomi, Y. and Fuse, T.: Bottleneck detection on pedestrian flow by modelling spatial dependence on fundamental diagrams, The 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Hefei, China, 2016.10.20.
- (5) 中西航, 妹背政毅, 布施孝志, 仙石裕明: 非集計データに基づく非定常歩行者到着分布のモデル化, 第55回土木計画学研究発表会(春大会), 愛媛大学, 愛媛県松山市, 2017.06.11.
- (6) 中西航, 福富義章, 布施孝志: Harmonic Spatial Filtering による歩行者流の密度-速度関係における空間相関のモデル化, 第36回交通工学研究発表会, 日本大学理工学部, 東京都千代田区, 2016.08.08.
- (7) 中西航, 布施孝志: 測位値とネットワーク情報を併用した歩行軌跡の逐次推定, 第53回土木計画学研究発表会(春大会), 北海道大学, 北海道札幌市, 2016.05.28.
- (8) 福富義章, 中西航, 布施孝志: 歩行空間評価に向けた歩行速度の空間パターン抽出に関する研究, 第53回土木計画学研究発表会(春大会), 北海道大学, 北海道札幌市, 2016.05.28.
- (9) 中西航, 布施孝志: 複数モデルの混合による歩行者の行動分析に向けた検討, 第52回土木計画学研究発表会(秋大会), 秋田大学, 秋田県秋田市, 2015.11.21.

6. 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。