

(11) Wi-Fi パケットセンサを用いた 街路空間における歩行者行動の分析： 京都市東山地区を対象として

木村 優介¹・東川 晃久²・須崎 純一³

¹正会員 京都大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

E-mail: kimura.yusuke.8m@kyoto-u.ac.jp

²正会員 神戸市都市局 (〒651-0087 神戸市中央区御幸通 6-1-12)

E-mail: higashikawa.akiyama.34x@kyoto-u.jp

³正会員 京都大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

E-mail: susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

本研究は、Wi-Fi パケットセンサのデータにより、観光地の街路空間における歩行者行動や混雑の実態を把握しうる解析方法を提示するとともに、街路の利用状況が目的の異なる歩行者行動に与える影響を明らかにすることを目的とする。京都市東山地区を対象とした分析により、次の成果を得た。1) 各時間帯の観測データ数の推移を時期ごとに視覚化し、ライトアップ等の施策と対応したリンクの利用変化を把握した。2) 複数の行動目的を仮定した上で、混合正規分布と制約付きの EM アルゴリズムを用いて、単純移動・短時間滞在・長時間滞在に対応した分布の特性値を推定し、その時間変動からリンク上の観光行動や利用状況を把握した。3) 観測データ数と目的別平均値の関係から、所要時間に影響を与える観光行動や環境要因、購買行動が抑制される混雑水準を明らかにした。

Key Words: sensing data, tourist behaviour, pedestrian-flow analysis, EM algorithm, walking speed

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症の流行以前、日本を訪れる外国人観光客は年々増加の傾向にあり、特定の地域や観光施設に多くの人が集中していた。このような人の集中は観光地を中心に多くの経済的効果をもたらすものの、過度な集中は混雑として観光の魅力を損なう要因ともなる。感染症の拡大防止という観点からも、今後は混雑の緩和・解消がより重要な問題となることが想定される。

こうした混雑の緩和・解消には、街路空間での歩行者の行動や混雑の特性を把握することが重要である。そのため本研究では、Wi-Fi 機能を有する機器の移動履歴を収集可能な Wi-Fi パケットセンサの観測データを用い、区間を移動する所要時間の分布や街路空間の利用状況を把握することを試みた。観光地の街路空間における歩行者は、ある目的地へと単純に移動するのみならず、沿道施設での飲食・休憩や写真撮影など、街路空間での滞在それ自体も楽しんでいる。特に観光地においては、こうした行動が賑わいや混雑にも結びつくことから、区間の

所要時間を考える際にも、行動目的ごとに特性が異なることを考慮する必要がある。

そこで本研究では、混雑が発生している観光地の街路空間における歩行者行動や混雑の実態を把握しうる解析方法を提示するとともに、街路の利用状況が目的の異なる歩行者行動に与える影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、時間帯別に算出したセンサ間の歩行所要時間分布に対して混合正規分布を当てはめる手法を提案し、歩行所要時間の平均値や混合比といった目的別の特性値を算出する。その上で、歩行所要時間の時間帯ごとの変化について、方向・対象センサ間別に比較し、歩行者による混雑の実態を明らかにする。さらに、目的別の歩行所要時間と、利用状況を示す観測データ数との比較により、街路の利用状況を示す歩行者密度に歩行者行動がどのように影響されるかを明らかにする。

関連する既往研究として、主として人流分析のためのシステムの構築・改良¹⁾²⁾と、大域的な移動や経路パターンの分析、特に観光地区全体での滞在時間・周遊行動の分析³⁾⁴⁾が挙げられる。後者において、観光エリア単位

での滞在時間、すなわち所要時間の分析は行われているが、街路のスケールに相当する規模でのマイクロな分析は乏しい。本研究の特徴として、一つの街路に相当する規模の移動を対象とする点、時間帯ごとの歩行者行動を、リンクの所要時間の単純な中央値や平均値で表すのではなく、混合正規分布を仮定して行動目的ごとに特性値を推定して説明する点が挙げられる。

2. 対象地と使用データ

対象地は京都市東山区（図-1）とし、京都市による調査⁵⁾のデータ（主要な観光地でライトアップが行われる観光最盛期を含む2017年11月1日～2018年1月31日のデータ）を使用した。具体的なデータはパケットの受信時刻、観測センサ番号、AMACID（Anonymous MACID：秘匿化された機器固有のID）、RSSI（Received Signal Strength Indicator：受信強度）である。

本研究では街路ごとの観光客の歩行者行動の違いを明らかにするため、隣接するセンサ間（リンク）の移動に着目した。具体的には、三年坂、清水坂といった観光要素が集積しているリンクと、そうした観光エリアの中心に移動するためのリンクの計10リンク（A～J）を対象とした（図-1）。各リンクについて、南または東に進む方向を「上り」、反対方向を「下り」として定義し、リンクXの上り方向をX-1、下りの方向をX-2と表現する。

移動履歴の算出にあたって、各端末（AMACID）につ



図-1 対象地とセンサ設置箇所。太線が対象リンクを表す。

いての観測を時系列順に並べたうえで、 i 番目にセンサXで観測され、 $i+1$ 番目に隣接するセンサYで観測された場合に移動として扱い、その観測時刻の差を所要時間とした。実際には以下の3つの観点でスクリーニング処理を行い、非現実的な移動を除去した。本処理以降の分析にはMathWorks社のMATLABを使用した。1)センサの最近傍で観測されたと推定されるデータを利用。複数のセンサに同時にパケットが捕捉されることによる観測列の錯綜を避けるため、 i 番目と $i+1$ 番目の観測間隔が10秒以内の一連の観測列を一つの群とみなし、仮に2つ以上のセンサ番号が含まれている場合も、同じセンサで連続的に観測されている場合と同様、その群の中でRSSIの値が最高のデータを選択。2)センサの近隣で記録されたとは言い難いデータを除くため、RSSIの値が一定基準値以下（RSSI別の所要時間のヒストグラムにより-85dBmと決定）のデータを除去。3)以上の処理を施した後も残る非現実的な移動を取り除くため、歩行所要時間として扱う下限値 T_{XY} を設定（式(1)）。

$$T_{XY} = (D_{XY} - 2r) / V_{bw} \quad (1)$$

T_{XY} : センサXY間の歩行所要時間の下限値(分)

D_{XY} : センサXY間の最短距離(m)

r : センサの検知範囲(15m, 望月らの研究¹⁾)

V_{bw} : 速歩の速さ(97.5m/分, 厚生労働省⁶⁾)

3. 分析手法

(1) 時間帯別のリンクの利用状況の算出

AMACIDごとの時系列データを用いて、まずは全体の利用状況を把握するため、リンクの利用状況を表す観測センサ数を1時間帯ごとに算出した。当該時間帯にリンクに流入するデータ数を双方方向足し合わせて得られたリンクの利用状況が1日の中でどのように推移しているか、観光時期によってどのように変化するかを、散布図および時間帯ごとの中央値の変動によって確認した。

(2) EMアルゴリズムによる目的別所要時間分布の推定

あるリンクを移動する全てのAMACIDの歩行所要時間を把握するとき、IDごとの所要時間のばらつきはリンクの移動の仕方に大きく影響を受ける。行動別の実態を把握するため、このような移動の仕方を行動の目的と捉えた上で、以下の2つの仮定を置いた。1)行動目的は「単純な通過を目的とする移動」、「食べ歩き、街路上での写真撮影といった短時間滞在」、「沿道施設での飲食・休憩といった長時間滞在」の3つに区分される。2)同じ行動目的の所要時間の分布は正規分布に従い、全ての行動目的の所要時間分布は混合正規分布として表現しうる。

以上の仮定のもとで、確率モデルのパラメータを最尤

推定する EM アルゴリズム (Expectation–Maximization algorithm) を用いて歩行所要時間の分布 (所要時間の小さい順に $i = 1, 2, 3$ とし, 平均値 μ_i , 標準偏差 σ_i , 混合比 π_i) を推定した. 本推定には統計解析ソフトウェア R の mixtools⁷⁾を使用した. 具体的推定にあたっては, データ数の確保のため, 2 時間帯にデータを区分した上で 1 時間ごとに推定を行なった. 初期値依存性を回避するため, 初期値をランダムに与えて推定を繰り返し, 対数尤度が最良の結果を選択した. 結果が収束しない場合を避けるため, データ数が 60 以下 (経験的な閾値) となる時間帯は推定の対象外とした. またリンクごとの比較を行うために, 所要時間を 100m あたりの時間に統一した.

さらに本研究ではデータに対する過度な適合により生じる不適切, 不安定な推定を避けるため, 制約付きの EM アルゴリズムを導入した. 単純な移動の分散はセンサ区間や利用状況に寄らずほぼ一定であると仮定し, 標準偏差 σ_1 を固定値 (予備検討を通じて 0.5 分/100m と決定) とした. なお推定の過程で固定値を適用した分布の順序が入れ替わった場合, その結果は除外した.

以上の方法で得られた各分布の平均値 μ_i と混合比 π_i の時間変化を 3. (1) と同様に整理し, 1 日の中での推移や時期による違いを考察した.

(3) 各行動の特性値と利用状況の関連分析

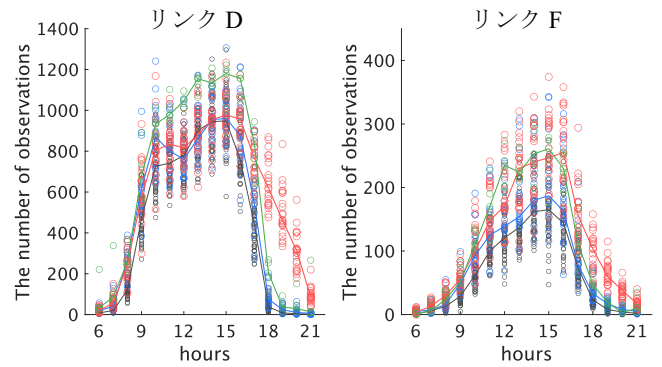
歩行者の行動はその密度に影響を受けることが知られている. 観測データ数の増加とともに単純移動の平均値 μ_1 や滞在行動の平均値 μ_2 がどのように変化するかを明らかにするため, 3. (1) (2) の結果から, リンクの利用状況と各行動の特性値の対応関係をリンク別, 方向別に散布図として視覚化し, 観測データ数の増加とともに各行動の所要時間がどのように変化するかを分析した.

4. 分析結果と考察

(1) 時間帯別のリンクの利用状況の推移

各リンクにおいて 1 時間ごと (6~21 時台) の時間帯に観測されたデータ数の推移のうち, リンク D, F の結果を図-2 に示す. 図示にあたっては, 観光最盛期である清水寺・高台寺のライトアップ期間 (11/11~12/3), 高台寺のみのライトアップ期間 (10/21~11/10, 12/4~12/10), 年末年始 (12/30~1/3), これらを除く通常期に分けた.

両リンクともに朝方から昼まで増加し, 夕方から夜にかけて減少しており, 一般的な来街者数の推移と同様の傾向を示している. 特に清水寺・高台寺のライトアップ期間 (赤) とそれ以外とを比較すると, 昼時における観測数はいずれのリンクにおいても多くなっており, さらに 17 時以降の時間帯でも観測数が維持されている. こ



凡例 灰: 通常期, 青: 高台寺のみライトアップ (LU) 期
赤: 清水寺・高台寺 LU 期, 緑: 年末年始

図-2 リンク D, F の時間帯ごとの観測データ数 (折れ線は各時期のデータの中央値を表す)

れらの傾向は全リンクに共通していた.

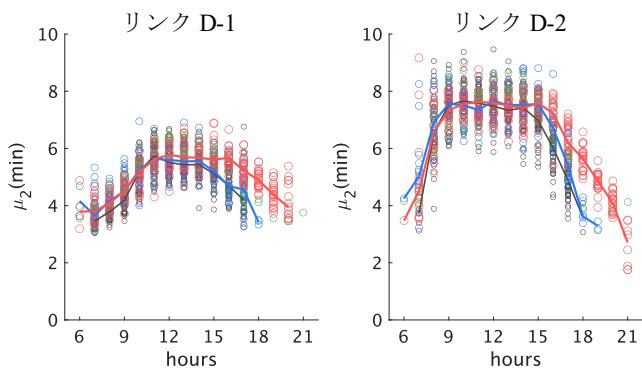
このように清水寺・高台寺のライトアップ期間において 17 時以降の観測データ数の増加が確認されたが, 朝方の時間帯 (6~9 時台) においては観測データ数の変化があまり見受けられない. 夕方の時間帯はライトアップという施策によって行動変化が生じた一方で, 昼時を避け朝方に来訪するというような行動変化は生じていないことから, 一層の時間的分散には朝方における行動を促進する外的要因が必要であるといえる.

(2) EM アルゴリズムによる目的別所要時間分布の推定

混合正規分布の推定結果に関して, リンク D に関する一部の特性値 (平均値) の時間帯推移を図-3 に示す. 図示にあたっては, 4. (1) と同様に 4 時期に分けた.

単純移動の混合比 π_1 については, 各時間帯を通じて 0.6 程度を上回るか否かという傾向が全リンクに見受けられた. これは移動目的が主となる非観光リンクと, 単純移動以外の割合が過半を超える, それ自身が観光の対象となる観光リンクに分類しうることを示している. 観光リンクと判断されたものとして, ねねの道・二年坂・三年坂・清水坂という以前より主要な観光ルートとして知られるもの (リンク A, B, C, D) の他に, 八坂の塔 (法観寺, センサ No.12) を始点終点に含む箇所 (リンク E, F), 京都市清水坂駐車場の出入口 (リンク J) がある.

次に平均値 μ_i のうち, 単純移動の平均値 μ_1 については, 時間帯によらず 2 分/100m 程度となるリンクと, 14 時前後にピークをとるリンクが確認された. 非観光リンクでは前者の傾向, 観光リンクでは後者の傾向を示していた. 短時間滞在の平均値 μ_2 について, μ_1 の傾向と同様に非観光リンクでは時間帯によらず維持傾向, 観光リンクでは増加減少傾向が確認され, 特にリンク D では観光リンクの顕著な傾向が確認できる (図-3). ねねの道から清水坂にいたるリンク A, B, C, D は観光客を対象としたお土産屋や飲食店が多く立地する傾向にあり, 短時間滞在につながっていると考えられる.



凡例 灰：通常期，青：高台寺のみライトアップ (LU) 期
赤：清水寺・高台寺 LU 期，緑：年末年始

図-3 リンク D の短時間滞在の平均歩行時間 μ_2 の方向別時間変化 (折れ線は各時期のデータの中央値を表す)

(3) 観測データ数と分布の平均値との関係

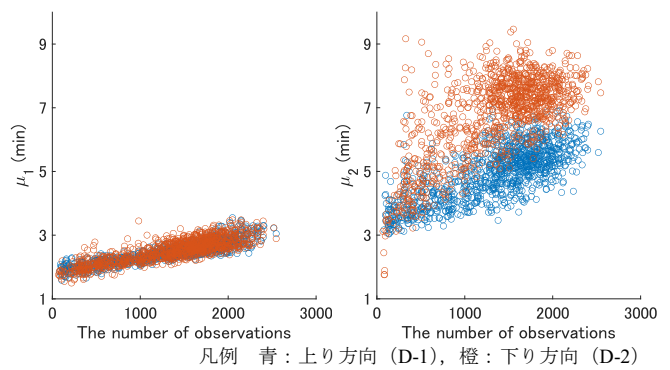
各リンクにおける観測データ数と単純移動の平均値 μ_1 、短時間滞在の平均値 μ_2 との関係のうち、リンク D の結果を図-4 に示す。観測データ数の増加とともに単純移動の平均値 μ_1 も増加する傾向が確認できる。人の増加によって混雑が生じると、移動に時間を要するという現象を捉えていると考えられる。

μ_1 と同じく、観測数の増加とともに短時間滞在の平均値 μ_2 も増加する傾向が確認できる。他のリンクと比較しても、特にリンク D においては方向別の影響の違いが明確であり、さらに D-2 (下り方向) において観測数が 1,500 程度を超えると μ_2 が増加しないという特徴が見て取れる。前者の特徴について、上り方向では他の区間と大きく変わらない値を示している一方、下り方向では上り方向より 3分/100m 前後 (実距離換算で 6.5分前後) 所要時間が増加している。4.(2)の通り、清水寺からの帰りに土産物を購入するという現象が捉えられた結果と考えられる。さらに後者の要因として、極度の混雑状態では、土産物店なども大変な混雑状態となるため、購買行動を打ち切る状態が生じることが考えられる。

5. おわりに

本研究は、Wi-Fi パケットセンサデータを用いて、混雑が発生している観光地の街路空間における歩行者行動や混雑の実態を把握しうる解析方法を提示するとともに、街路の利用状況が異なる目的の歩行者行動に与える影響を明らかにした。京都市東山地区を対象とした分析により、得られた成果は以下の通りである。

- ・各時間帯の観測データ数の推移を時期ごとに視覚化することにより、ライトアップ等の施策と対応した利用変化を把握した。ライトアップは夕方以降の来訪者の増加をもたらすが、朝方にまで時間的分散を拡大させる効果をもたらすには至っていないことが示唆された。



凡例 青：上り方向 (D-1)，橙：下り方向 (D-2)

図-4 リンク D の観測データ数と平均歩行時間 μ_1 との関係 (左：単純移動，右：短時間滞在)

- ・リンクの歩行所要時間の分析にあたり、複数の目的を仮定した混合正規分布と制約付き EM アルゴリズムを用いることで、3つの目的に対応した分布の特性値が得られた。特性値の平均値と混合比の時間変化を可視化することで、リンク上での観光行動や利用状況を明らかにすることができた。
- ・観測データ数と目的別の平均値の散布図から、観光形態を踏まえた利用実態を明らかにした。特に、目的別に推定を行うことで、沿道店舗での購買行動が抑制される水準を明らかにすることができた。

今後の課題として、混合分布による推定の妥当性を検証するために、単峰型分布を含めた結果の定量的な比較を行うことが考えられる。

謝辞：本研究は、国土交通省道路局「道路政策の質の向上に資する技術研究開発 (課題名：観光流動把握を目的とした交通流動推定システムの研究開発)」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 望月祐洋, 上善恒雄, 西田純二, 中野秀男, 西尾信彦：Wi-Fi パケットセンサを利用した匿名人流解析システムの構築, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-MBL-70, No.45, pp.153-160, 2014.
- 2) 望月祐洋, 鬼倉隆志, 福崎雄生, 西尾信彦：Wi-Fi パケット人流解析システムの実環境への適用, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム2014論文集, pp.1249-1257, 2014.
- 3) 壇辻貴生, 杉下佳辰, 福田大輔, 浅野光行：Wi-Fi パケットデータを用いた観光客の滞在時間特性把握の可能性に関する研究 -奈良長谷寺参道における試み-, 都市計画論文集, Vol.52, No.3, pp.247-254, 2017.
- 4) 伊藤伸, 倉内文孝, 安東直紀, 西田純二：Wi-Fi パケットセンサデータによる観光行動把握の可能性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.56, 158, 2017.
- 5) 京都市：Wi-Fi パケットセンサによる歩行者流動調査の実施について, <<https://www.city.kyoto.lg.jp/tokei/cmsfiles/contents/0000225/225789/01.pdf>>, (入手2020.2.7).
- 6) 厚生労働省：健康づくりのための運動指針, 2006.
- 7) Package 'mixtools', R Project, <<https://cran.r-project.org/web/packages/mixtools/mixtools.pdf>>, (入手2020.2.7).