

混雑時の駅構内における歩行者流の 速度-密度関係の空間パターン

平林 新¹・中西 航²・福田 大輔³

¹非会員 東京地下鉄株式会社 (〒 110-0015 東京都台東区東上野 3-19-6)

E-mail: s.hirabayashi.e8g@tokyometro.jp

²正会員 東京工業大学助教 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail: nakanishi@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

駅構内の歩行空間の安全性・快適性の重要性が高まっており、詳細なデータに基づく精緻な評価が望まれる。また、歩行軌跡データの取得・処理は易化しており、その活用が期待されている。これを踏まえ、本研究では、朝ラッシュ時間帯の駅構内における大量の軌跡データをもとに、速度-密度関係における大局的および局所的な特徴把握を行うとともに、その長期的な安定性や短期的な変動を検討する。既存手法に倣い、歩行者流の速度-密度関係に空間相関を仮定した固有ベクトル空間フィルタリングを用いた回帰を行い、同一密度で実現する速度の大小を表す空間パターンを得た。適用結果から、交錯部のような自明な混雑地点に加え、潜在的な混雑箇所を抽出した。また、同一時間帯であれば異なる日であっても類似した空間パターンが示された。

Key Words : *Evaluation of pedestrian facility, Pedestrian flow, Spatial autocorrelation, Station concourse*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

歩行空間の安全性・快適性の向上がより重視される時代を迎え、国土交通省¹⁾や東京都²⁾は歩行者中心の街づくりを推進している。一方で、山本ら(2013)³⁾にみられるように、現存する駅構内の歩行空間からは危険を感じることも多い。このような状態を改善し、より良い歩行空間を設計していくためには、歩行空間の性質の正確な把握に基づく詳細な評価が必要である。そのためには実空間における歩行軌跡データが必要であるが、従来その取得は手作業により多大な労力を要するものであった。しかし近年では、データの取得・処理は撮影技術の向上と画像認識技術の向上により易化しており、空間全体にわたる詳細なデータを取得できるようになりつつある。ゆえに、そのようなデータの歩行空間の詳細な評価への活用が期待されている。

ところが、既存の歩行空間評価方法は、代表点での速度や流率の測定結果を空間全体の評価と見做すものが多い。この手法の場合、事前に評価地点が定められており、その地点における評価しか行えないため、対象空間の性質の把握を十全に行うことは難しい。たとえば、ボトルネック箇所の特定等の空間内の各地点の特徴(以降局所空間性と呼ぶ)の把握は原理的に不可能である。他方で、局所空間性を考慮した歩行空間評価方

法の例として、Nakanishi et al.(2017)⁴⁾がある。そこでは、空間内の各地点で同一密度で実現する速度の大小を空間パターンとして導出している。この空間パターンは局所空間性の発現と捉えられ、これを用いることで同一密度において速度が出にくい地点を特定できるため、空間内のボトルネック箇所の把握も可能となる。また、空間内の各地点を統一的な枠組みで評価・比較することができるため、代表点における測定に基づく方法とは異なり、事前に特異な性質を持つ地点の予測も必要としないという利点がある。

本研究では、駅構内における歩行者の大量かつ高解像度な移動軌跡データを用い、局所空間性の把握を可能とする空間パターンの抽出を目的とする。具体的には、先行研究⁴⁾同様の(1)空間パターンの推定と基礎的な解釈を行った上で、そこでの課題である(2)適用対象地の蓄積とStylized fact性の検証(実証分析に基づく大筋の特徴把握)と(3)得られた空間パターンを解釈する方法の確立とを目的とする。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置付け

代表点での速度や流率の測定結果を空間全体の評価と見做す手法として、現行の歩行空間評価方法の代表例であるFruin(1971)⁵⁾、佐野ら(2002)⁶⁾、鈴木ら(2012)⁷⁾の提案手法がある。これらの手法はボトルネック箇所や空間容量等の正確な把握が行えない等の課題がある。

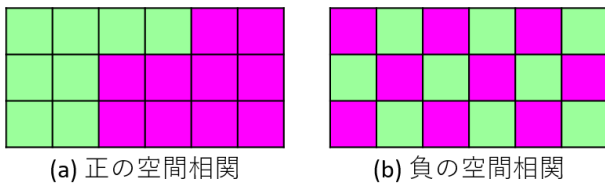


図-1 空間相関の概念

これに対し、局所空間性を考慮した歩行空間評価方法、すなわち代表点を選ばず空間内の各地点の性質の評価を行う方法として、日比野ら(2005)⁸⁾、南ら(2006)⁹⁾、Nakanishi et al.(2017)⁴⁾の提案手法がある。これらは統一的な枠組みに基づき全地点を評価できる点、特異な地点の予測が不要である点に加え、評価対象の地点が多く大量データの利活用との相性が良いという利点もある。

その中でも Nakanishi et al.(2017)⁴⁾の提案手法は、交通流理論の根幹をなす速度-密度-流量の関係図を指す Fundamental Diagram (FD) において、近接する地点同士の性質の類似性・異質性を表す空間相関を考慮することで、前節で説明した空間パターンを得ている。交通流理論に則っていることや、後述する空間相関のモデル化手法により計算負荷が比較的小さいと想定されることが利点として挙げられる。ただし、Nakanishi et al.(2017)⁴⁾は主としてモデル化の提案を行っているものであり、実際に空間パターン抽出方法として用いるためには適用例の蓄積が不足している。すなわち、適用対象地が2箇所、適用時間も長くて30分間に過ぎず、推定結果である空間パターンの解釈は詳細には行われていない。本研究は大量データを用いた推定を行い、空間パターンの解釈を詳細に行うことで、これらの課題の解決を図るものと位置づけられる。

2. 基礎とする理論

本研究は FD と空間相関の理論を基礎に置いている。

まず、速度-密度-流量の関係図である FD は交通状態を表す理論である。FD を把握できると交通状態を詳細に把握することができる。本研究は、FD が歩行者流において成り立つと仮定する。特に $v = \beta_0 + \beta_1 k$ で表される Greenshields モデルを扱う。ここで v は速度、 k は密度、 β_0 は定数パラメータ、 β_1 は密度の係数パラメータである。

次に、近接する地点同士の性質の類似性・異質性を表す空間相関の概念は、メッシュが地点を、色が地点の性質を表すものとして、図-1 で示すように、近いほど類似するという状況を表すものである。そして類似

性が高いことを正の空間相関が大きいと表現する。

空間相関の強さの指標として Moran's I があり、これは式 (1) で定義される。

$$I_{\text{moran}} = \frac{n}{S_0} \frac{\mathbf{y}'(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{y}}{\mathbf{y}'(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{y}} \quad (1)$$

ここで n はデータ数、 \mathbf{y} は空間相関を評価したい変数のベクトル、 $\mathbf{1}$ は各要素が 1 のベクトル、 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{C} は空間重み行列、 S_0 は \mathbf{C} の全要素の和である。 I_{moran} は -1 から 1 の間の値を取り、1 に近いと正の空間相関の存在を示唆する。

このような空間相関の影響を表現する回帰手法として、Griffith(1996)¹⁰⁾の提案した固有ベクトル空間フィルタリング (Eigenvector Spatial Filtering, ESF) がある。ESF の基本式は式 (2) のようになる。

$$y_i = \beta_0 + \sum_{h=1}^{k-1} x_{h,i} \beta_h + \sum_j E_{j,i} \gamma_j + \varepsilon_i \quad (2)$$

ここで y_i は被説明変数、 $x_{h,i}$ は説明変数、 β_0 は定数項、 β_h は $x_{h,i}$ の回帰係数、 i は地点 ID、 h は x の ID、 k は定数項を含めた x のパラメータ数、 $E_{j,i}$ は上述の Moran's I の式 (1) に含まれる $(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)$ の j 番目に大きい固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{E}_j の i 番目の要素、 γ_j は \mathbf{E}_j に対応する回帰係数、 ε_i は誤差項である。

式 (2) における右辺第 2 項までの部分と第 4 項を合わせた $y_i = \beta_0 + \sum_{h=1}^{k-1} x_{h,i} \beta_h + \varepsilon_i$ は、被説明変数 y_i を説明変数 $x_{h,i}$ で回帰する通常の線形回帰モデルである。このとき、誤差は各 i について独立に同一の分布に従うと仮定されている。しかし、被説明変数が位置情報を持っている場合は、空間相関が存在するため、この仮定を満たさないことが多い。したがって、このまま回帰を行うと、回帰係数の推定が不正確になるとともに、残差に空間相関が残る。ESF では、空間相関に起因するこの問題を解決するために、式 (2) の右辺第 3 項の $\sum_j E_{j,i} \gamma_j$ を説明変数として追加する。 \mathbf{E} は、 \mathbf{E}_1 から順に大域的なパターン (空間相関) を示す説明変数の役割を果たし、かつそれぞれは互いに直交基底を構成するという特徴を有する。実際に回帰に投入する \mathbf{E} は、Griffith(2013)¹¹⁾によれば Moran's I が 0.25 以上のものからステップワイズ法で変数選択を行って決定するとしている。このとき、推定結果のうち $\sum_j E_{j,i} \gamma_j$ の項は、空間相関の発現である空間パターンを示しているとみることができ

3. データセットの構築

スイス国鉄のハブ駅であるローザンヌ駅の地下通路 (図-2 参照) の歩行軌跡データを用いる。この駅にはホームにアクセスできる地下通路が東・西と 2 本あり、朝ラッシュ時は両通路共に混雑する。データは 2013 年の

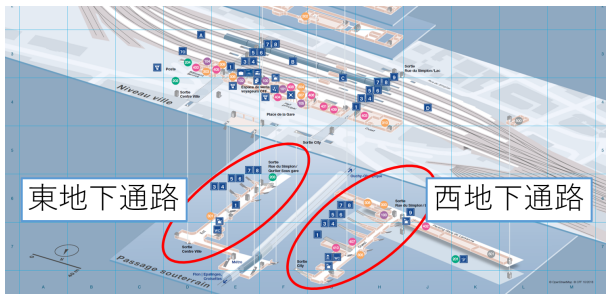


図-2 ローザンヌ駅の構内図 (スイス国鉄 HP¹²⁾ から引用したものに著者加筆)

1 月から 4 月の平日 10 日間の 7:00~8:30 の 0.1 秒毎の歩行軌跡データであり、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) が抽出したものである。これに速度データは含まれていないため、1 秒ピッチでデータを抽出して、1 秒前との座標の差分を取って速度を算出した。

まず、各メッシュの速度・密度を Zhang et al.(2011)¹³⁾ の提案手法に基づき算出する。歩行者 i を核とする Voronoi セル A_i を描き、時刻 t における A_i の面積を $A_i(t)$ 、歩行者 i の速度を $v_i(t)$ とし、地点 $(x, y) \in A_i$ の密度を $k_{xy}(t) = 1/A_i(t)$ 、速度を $v_{xy}(t) = v_i(t)$ と与える。そして各メッシュの速度 $v(t)$ ・密度 $k(t)$ を、 $[\Delta x, \Delta y]$ のメッシュを各 A_i が占める面積の重み付け平均として式 (3)・(4) で示すように算出する。

$$k(t) = \frac{\int \int_{[\Delta x, \Delta y]} k_{xy}(t) dx dy}{\Delta x \Delta y} \quad (3)$$

$$v(t) = \frac{\int \int_{[\Delta x, \Delta y]} v_{xy}(t) dx dy}{\Delta x \Delta y} \quad (4)$$

次に、適用対象のエリア選定を、物理的に歩行可能であり、各メッシュの歩行者の通過頻度に極端な差が生じないように行った。具体的には、壁の内側やエレベーターの内部を除外したうえで、最大通過数を記録したメッシュの 1 割以上の通過数を記録したメッシュのみを抽出した。

また、歩行中の通路利用客が分析対象であるので、速度 v [m/s] に $0.5 < v < 3.0$ と閾値を設けた。さらに、通路が空いている状況では、上述の算出方法では 1 人の歩行者により多くのメッシュの速度・密度が同一の値になり、局所空間性が見られなくなる可能性がある。これを防ぐために、Voronoi セルは歩行者から 5m 以内のメッシュでのみ計算した。

これらの手続きにより、選定したエリア内の各メッシュにおける速度・密度データを 10 日間の各 90 分ぶん作成した。メッシュデータ数は東通路で 1334 万 1042 個、西通路で 1421 万 5026 個となった。

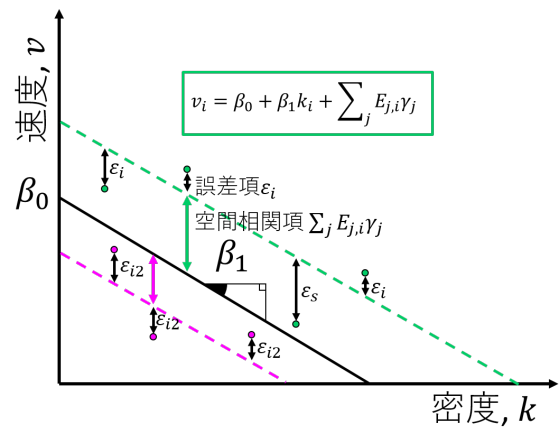


図-3 空間相関の影響を考慮した速度-密度関係

4. 手法の構築

ESF を用いて、速度-密度関係の誤差項に空間相関の影響を組み込む。FD には Greenshields モデルを採用し、変数 E を算出するのに必要な空間重み行列は Rook 型の隣接関係とした。また、変数選択手法は AIC を基準とし、有意水準 1% を満たす変数のみを選択対象とするフォワードステップワイズを採用した。回帰式は式 (5) で表され、密度-速度平面は図-3 のように表される。

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 k_i + \sum_j E_{j,i} \gamma_j + \varepsilon_i \quad (5)$$

1.(1) で述べたとおり、本研究では (1) 空間パターンの推定と基礎的な解釈、(2) 適用対象地の蓄積と Stylized fact 性の検証 (実証分析に基づく大筋の特徴把握)、(3) 得られた空間パターンを解釈する方法の確立を目的としている。以下で、(1) から順に採用した手法の説明を行う。

まず、(1) として、AIC、残差平方和、パラメータの正負、パラメータの大きさ、空間相関の大きさを確認する。また、得られた空間パターンの解釈と、空間パターンの実空間との照合を行う。

次に、(2) として、大量データへの手法の適用を行う。時間帯を非混雑時間帯 (7:18~7:28)、混雑時間帯 (7:35~7:45)、7:00~8:30 の各 10 分、全 90 分の 12 通りで、日付を各日と全 10 日間の集計の 11 通りでそれぞれ定義した。これら時間帯と日付の組み合わせ全 132 通りのサンプルを作成し、手法を適用する。比較に際しては同じ日付同士の比較 (日内比較) と、同じ時間帯同士の比較 (日間比較) を行う。その際の比較項目を、大域的なパターンの類似性・空間分布、局所的なパターンの類似性・異質な場所、空間相関の影響の大きさの類似性、の 5 点とする。

さらに、(3) として、まず各メッシュの空間相関項 $\sum_j E_{ji}\gamma_j$ が有意に存在するかの仮説検定を行う。具体的には、各係数パラメータ γ_j のサンプリングを通して空間相関項 $\sum_j E_{ji}\gamma_j$ を擬似的にサンプリングしモンテカルロシミュレーションを行い、各メッシュの空間相関の影響が 0 でないことの t 検定、すなわち帰無仮説 H_0 が $\sum_j E_{ji}\gamma_j = 0$ の t 検定を行った。このときサンプリング回数は 400 回、有意水準は片側それぞれ 1% としたので、正または負のサンプルが 4 個以下 (他方が 396 個以上) であれば、当該メッシュの空間相関の影響の存在は有意だと見做すことができる。なお、本来はパターンが模様として有意であるかを検証したい。ただし、現時点では統計的にそのような評価を行う手法が存在しないため、各メッシュの空間相関項の有意性の検定を実行可能な方法として採用した。

また、各メッシュの空間相関項を要素にもつ列ベクトルのクラスタリングを行い、空間パターンの類似性を確認する。具体的には、距離をユークリッド距離で定義し、Ward 法と k -means 法を適用する。こちらも、本来はパターンが模様として似ているか、すなわち空間相関の影響が正の領域、負の領域といったまとまりを基準とした類似性を判定したい。ただし、統計的にそのような手法が確立していないため、対応する各メッシュ同士の間隔 (類似性) を足し合わせることで類似性を検討することとした。

5. 適用結果と考察

本章で述べることは各通路・各日・各時間帯で確認しているが、紙面の都合上一部の結果を例に説明する。

まず、目的の (1) に対応して、先行研究⁴⁾ に倣い推定結果の基礎的な解釈を行った。空間相関を考慮することで AIC・残差平方和ともに改善され、推定精度の向上が確認できた (表-1)。

次に空間パターンを見る。対象空間の断面図と、得られた空間パターンをそれに重ねた図を、東通路の例で図-4 に示す。空間パターン内の四角く抜けている部分は実空間のエレベーターに対応している。またエレベーターの左右と空間パターンの最上部にはホームや駅の入口に繋がる階段がある。なおやや歪に抜けてい

表-1 東通路の 1 月 22 日の、非混雑時間帯における推定精度の比較

指標	通常回帰	ESF 回帰
残差平方和	24229.527	23848.264
AIC	150776.635	148747.286

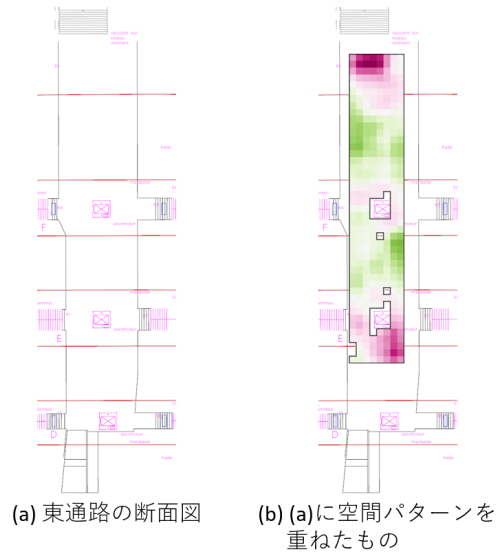


図-4 東通路における実空間と空間パターンの対応関係

る部分は、通過数が 3. データセットの構築で説明した条件を満たさなかったメッシュである。得られた空間パターンとして、図-4(b) のように、最上部から順に空間相関項が負の領域、正の領域、負の領域、正の領域、負の領域と並ぶ大域的なパターンが確認された。この空間パターンと実空間との照合を通して、階段やエレベーター周辺等の直感的にボトルネックとなりやすい領域に負の領域が広がっていることが確認された。一方で、東通路における正の領域の広がりの中に負の領域が見られる場合がある等、局所的なパターンの相違が確認された。また、非混雑時間帯と比べて混雑時間帯の方が空間相関の影響が大きいことも確認された。

次に、目的の (2) に対応して複数の空間パターン間で比較を行った。図-5 は、東通路の 1 月 23 日の各時間帯で得られた空間パターンを並べている。左から順に、7:00~8:30 の 90 分ぶん、7:00~7:10 の 10 分ぶん、7:10~7:20 の 10 分ぶん、…、8:20~8:30 の 10 分ぶんのデータから得られた空間パターンを示している。図-5 に見られるように、同日内の異なる時間帯における空間パターンを比較すると、大域的なパターンが類似していること、局所的なパターンは相違していることが確認された。また、図-6 は西通路の各日の非混雑時間帯 (7:18~7:28) で、図-7 は西通路の各日の混雑時間帯 (7:35~7:45) で得られた空間パターンを並べている。両者左から順に、全 10 日間を集計した 100 分ぶん、1 月 22 日の 10 分ぶん、1 月 23 日の 10 分ぶん、…、4 月 30 日の 10 分ぶんのデータから得られた空間パターンを示している。これらから、異なる日の同じ時間帯における空間パターンを比較すると、大域的なパターンに加え、局所的なパターンも類似していることが確認された。

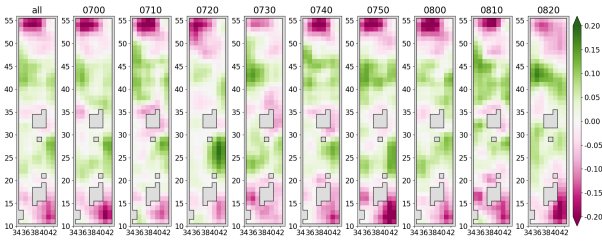


図-5 東通路の 1/23 の空間パターンの日内比較 (緑：正，赤：負，濃度：大きさ)

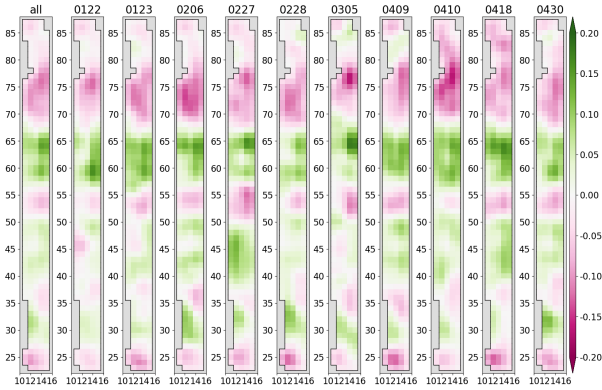


図-6 西通路の非混雑時間帯の空間パターンの日間比較

同日内同士の空間パターンも、同時時間帯同士の空間パターンも大域的なパターンが類似していることの要因として、共通して朝ラッシュ時間帯のデータが用いられていることが挙げられる。通路の交通状態には多少の変動があるものの全体的な流動は安定しており、その結果大域的なパターンが安定したと考えられる。一方、局所的なパターンは同日内同士では相違し、同時時間帯同士では類似した。この要因として、上記の交通状態の変動と、その変動の周期性が挙げられる。朝ラッシュ時間帯においても特に混雑の激しい時間や空いている時間は存在するように、抽出した時間帯によって交通状態は異なる。そして、各歩行者の通勤時刻や通勤経路は基本的に一定であり、異なる日であっても同時時間帯の交通状態の類似性は高い。ゆえに同日内の空間パターンの局所的なパターンは相違し、同時時間帯のものは類似したと考えられる。

さらに、目的の (3) に対応する空間パターンの有意性を検証した。図-8 は、東通路の 1 月 23 日の各時間帯で推定した各メッシュの空間相関の影響の存在の有意性を、時間帯ごとに並べて示している。左から順に、90 分の集計分と 7:00 からの各 10 分のデータから得られたものとなっている。図-8 のように、ほとんど全てのメッシュで空間相関の影響の存在が有意であることが確認できた。具体的には、階段・スロープ・エレベ

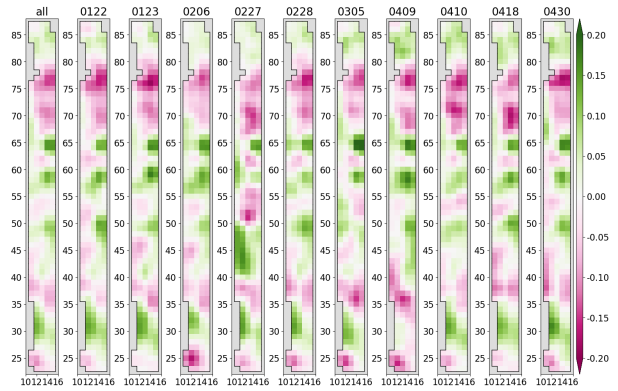


図-7 西通路の混雑時間帯の空間パターンの日間比較

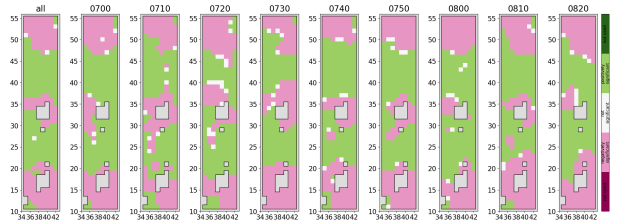


図-8 東通路の 1/23 の空間パターンの有意性 (緑：正に有意，赤：負に有意，白：有意でない)

ター周辺においては空間相関の影響の存在が負に有意となり、壁際などにおいては正に有意となる傾向が見られた。この結果から、対象空間において空間パターンが有意に存在することが統計的に裏付けられた。

続いて、空間パターンの類似性を検証した。非混雑時間帯と混雑時間帯の各 10 の空間パターン、合計 20 の空間パターンを対象とした。これらの空間パターンは図-6 と図-7 に示す通りであり、視覚的には非混雑時間帯のものと混雑時間帯のものに分けることができる。図-9 より、Ward 法に関してクラスタ数が 2 となるところで分類すると、非混雑時間帯と混雑時間帯に明確に分かれ、視覚的な分類の妥当性が統計的にも裏付けられた。また、 $k=2$ として k -means 法を適用したときも同様の結果が得られた。この要因として、同時時間帯同士では大域的なパターンも局所的なパターンも類似しており、異なる時間帯同士では局所的なパターンが相違していたことが挙げられる。

6. 結論と今後の課題

本研究では、駅構内の歩行空間の詳細な評価方法の確立を念頭に置き、歩行者の詳細な移動軌跡データを用いることで、局所空間性の把握を可能とする空間パターンの抽出を行った。得られた空間パターンは、実

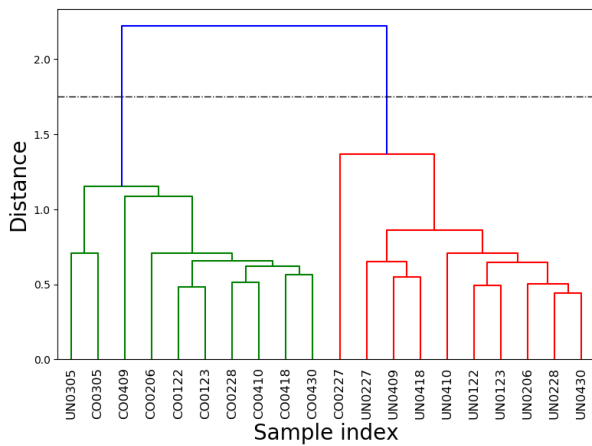


図-9 西通路の 20 サンプルへ Ward 法を適用した結果 (サンプル名の CON: 混雑時間帯, UN: 非混雑時間帯, 数字: 日付)

空間の障害物付近などで速度低下を示唆する妥当なものであった。具体的には、実空間との照合を通して、階段・スロープ・エレベーター周辺に空間相関の影響が負の領域が広がる傾向にあること、壁際に正の領域が広がる傾向にあることが確認された。また、大量データへの適用結果を日内・日間で比較し、大域的なパターンの安定性を示した。この要因として、いずれも通勤ラッシュ時間帯のデータを用いており、交通状態が類似していることが考えられた。最後に、それらの統計的有意性と、複数パターン間の統計的な類似性の直感的な混雑・非混雑との整合性を確認した。今後は、本研究で構築した手法による異常な空間パターンを示す日付・時間帯の発見や、実データとの照合による空間パターンの生起要因の詳細な検討を通して、歩行空間の設計・改善に向けて展開していくことが望まれる。

謝辞： 本研究で用いたデータはスイス連邦工科大学ローザンヌ校よりご提供いただいた。本研究は科研費(若手研究 B(15K18131) および基盤研究 B(17H03320))の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 国土交通省: 2. コンパクトなまちづくりを応援します!よくわかる中心市街地のまちづくり中心市街地活性化のまちづくり, <http://www.mlit.go.jp/crd/index/pamphlet/02/index.html>.
- 2) 東京都都市整備局: 道路空間の利活用(歩行者空間の創出)東京都都市整備局, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/kiban/dorokukan_rikatsuyo/index.html.
- 3) 山本昌和, 石突光隆: 駅の階段とホーム狭陰部における混雑時の歩行安全性評価, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 6, pp. 43-48, 2013.
- 4) Nakanishi, W., Fukutomi, Y. and Fuse, T.: Spatial fluctuation on speed-density relationship of pedestrian dynamics, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2017, No. 3, p. 033402, 2017.
- 5) Fruin, J. J.: *Pedestrian Planning and Design*, New York: Elevator World, 1971.
- 6) 佐野友紀, 高柳英明, 渡辺仁史: 空間-時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 67, No. 555, pp. 191-197, 2002.
- 7) 鈴木章悦, 日比野直彦, 森地茂: 都市開発による鉄道駅の混雑と施設容量に関する研究, 運輸政策研究, Vol. 15, No. 3, 2012.
- 8) 日比野直彦, 山下良久, 内山久雄: 鉄道駅におけるモニターカメラから得られる歩行者挙動データの活用に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 531-539, 2005.
- 9) 南正昭, 青山佑介, 安藤昭, 赤谷隆一: 街路における歩行空間設計と有効幅員に関する調査研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 417-422, 2006.
- 10) Griffith, D. A.: Spatial Autocorrelation and Eigenfunctions of Geographic Weights Matrix Accompanying Geo-Referenced Data, *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, Vol. 40, No. 4, pp. 351-367, 1996.
- 11) Griffith, D. A.: *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering: Gaining Understanding Through Theory and Scientific Visualization*, Springer Science & Business Media 2013.
- 12) スイス連邦鉄道: Trafimage Station Plans — SBB, <https://www.sbb.ch/en/station-services/railway-stations/trafimage/station-plans.html>.
- 13) Zhang, J., Klingsch, W., Schadschneider, A. and Seyfried, A.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2011, No. 06, p. P06004, 2011.

(2019. 10. 4 受付)

SPATIAL PATTERN OF PEDESTRIAN SPEED-DENSITY RELATIONSHIP IN CROWDED STATION CONCOURSE

Shin HIRABAYASHI, Wataru NAKANISHI and Daisuke FUKUDA