

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

福富 義章¹・中西 航²・布施 孝志³

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

E-mail: fukutomi@trip.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 博士 (工学) 東京大学助教 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

E-mail: nakanishi@civil.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 博士 (工学) 東京大学准教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

E-mail: fuse@civil.t.u-tokyo.ac.jp

高度で精緻な歩行空間の施設設計や流動制御に向けては、対象空間内部の状態を詳細に把握する手法が必要だが、従来は特定箇所での密度や速度の測定結果をもって空間全体の評価とみなしている。そこで本研究では、空間内各所での混雑しやすさなどの傾向を把握して空間全体の評価に組み込む手法の構築を目指す。まず、対象空間をメッシュ状に区切り、メッシュ単位での局所的な歩行者流の速度・密度を定義および算出する。次に、算出した速度を密度で回帰する際に、メッシュ状のデータに空間相関を仮定し、固有ベクトル空間フィルタリングを適用する。実データへの適用を通し、空間相関の導入による回帰精度向上を確認するとともに、歩行速度の空間パターンを推定した。この空間パターンから、空間評価の精緻化や対象空間の特性の解釈を試みた。

Key Words: *Pedestrian fundamental diagram, Eigenvector Spatial Filtering, Spatial autocorrelation, Spatial pattern analysis*

1. はじめに

歩行空間の適切な設計・計画は、歩行者の安全で快適な通行のために重要である。広場や通路や廊下といった通行・滞留の用に供される場所である空間の性能や状態を何らかの手法で評価することは、その設計・計画に役立つことが期待される。現在用いられている歩行空間の評価基準の一つとして、Fruin(1971)¹⁾がある。この方法では、広場なら広場、駅通路なら駅通路というように一定の役割を持った空間を一つの対象とみなし、その対象を均一に評価することになる。しかし、この方法は対象空間内の一部のみの密度に基づく評価を対象空間全体に拡張している点で、実用に十分ではない。同一の歩行空間内が常に均一な状態であるとは限らないため、対象空間内の各所がどのような状態であるかを含めて空間全体を評価する手法には議論の余地がある。現状ではこのような歩行空間の局所的状態の把握を含めて空間全体の評価を行う手法は確立されていない。

この課題に対して本研究は、歩行速度の空間パターンの把握に焦点を当てる。空間パターンとは、対象空間内で速度が高くなり易い傾向にある箇所の分布や、その広がり方が大域的であるか局所的であるか、またそれぞれの傾向の強さ等によって表される空間の特性である。その把握のために、対象空間全体の各所で速度・

密度のような評価値の高解像度な測定を行い、その各測定点相互における関係性を、空間相関のモデル化によって表現することを考える。そのための手法としては、回帰式に空間相関を表す項を線形に足し合わせることでできる固有ベクトル空間フィルタリング²⁾がある。この手法は回帰問題である交通流の基本図の推定(2.で後述)に組み込むことができ、またその結果は上述の空間内のパターンとして解釈することができるため、本研究に適している。

以上の背景から、本研究の目的を、歩行空間の性能・状態評価のため、対象空間内各所の局所的な状態を把握し、空間全体の評価に組み込む手法を構築すること、と設定する。

本研究では対象空間をメッシュ状に区切って評価する。このため、まずはメッシュ区分の速度・密度の定義を検討し、それに基づいてメッシュごとの速度・密度を算出する。このデータに対して、固有ベクトル空間フィルタリングを用いた上で速度を密度で回帰し、回帰式と空間パターンを得る。また、固有ベクトル空間フィルタリングを用いない通常の回帰の場合とも比較し、空間相関を考慮することにより回帰精度が向上することを示す。手法の適用は横断歩道で計測した実際の歩行者流データに対して行う。

本稿の構成は以下の通りである。まず第2章で交通流の基本図について説明し、本研究におけるメッシュ区

分の速度・密度の定義手法を述べる。続いて、第 3 章で固有ベクトル空間フィルタリングを概説し、空間相関をモデル化する手法を提案する。次に、第 4 章で実データへの適用結果とその考察を示し、最後に第 5 章で本研究の成果と今後の課題を述べる。

2. 交通流の基本図と歩行者流

(1) 基本図における回帰式の形

通常、対象空間で観測した変数のプロットからは、変数同士の関係性を回帰式等の形で示すことが必要になる。交通量分析の分野においては、この回帰は従来から基本図 (Fundamental Diagram) の推定として研究が行われている。基本図を推定できれば、交通流の現状把握・予測や、空間の制御・設計に利用できるからである。このため、本研究でも基本図の推定手法を応用する。ここでは、回帰に際して仮定する式形として、これまでに提案されているもののうち本研究で用いる 3 種類を示し、速度 v を密度 k で回帰する簡単な形に直して整理する。

Greenshields³⁾ は、図-1 の赤色のように、速度 v と密度 k に線形な関係を仮定した。即ち、最大渋滞密度 ($v = 0$ となる密度) を K_{Max} 、自由流速度 ($k \simeq 0$ のときの速度) を V_f としたとき、

$$k = K_{\text{Max}} \left(1 - \frac{v}{V_f} \right) \quad (1)$$

である。これを变形すると、

$$v = \alpha k + \beta \quad (2)$$

となる。但し、 α, β はパラメータである。

Greenberg⁴⁾ は、流体力学の考え方をもとに、図-1 の青色のような速度 v と密度 k の関係を仮定した。このときの $k-v$ 関係は

$$v = c \ln(K_{\text{Max}}/k) \quad (3)$$

である。但し、 K_{Max} は最大渋滞密度である。これを变形すると、

$$v = \alpha \ln k + \beta \quad (4)$$

となる。但し、 α, β はパラメータである。

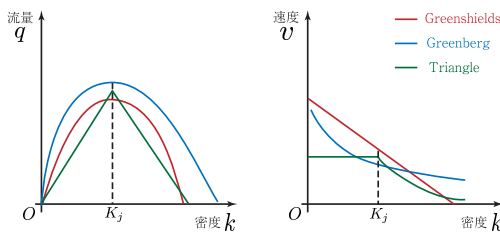


図-1 基本図で仮定される式形概念図。左が密度 k と流量 q の関係、右が密度 k と速度 v の関係である。最大流量を与える密度が最大自由流密度 K_j である。

密度-流量の基本図として、図-1 の緑色のような、最大流量を与える密度である最大自由流密度 K_j を中心とする三角形のものを仮定する方法も考えられる。この場合、渋滞流でないとき、即ち $k < K_j$ では、速度 v は密度 k に依らないから、 α を定数として

$$v = \alpha \quad (5)$$

となる。

(2) 歩行者流の変数の定義

基本図の推定のためには、速度 v 、密度 k をそれぞれ定義する必要がある。しかし、歩行者の場合、これらの定義は簡単ではない。様々な研究者が種々の定義を提案しているが、それぞれで異なった結果となっている⁵⁾のが現状である。それらの定義の中では、対象空間内の人数を面積で割るという伝統的な定義では密度の値が離散的になる等の問題点が指摘されている⁶⁾。そんな中で Steffen⁷⁾ が提案した、Voronoi 図を用いた手法が存在する。Zhang⁸⁾ はこの Voronoi 図を用いた定義と既存の定義とを含む 4 種類の定義を比較して実験し、Voronoi 図を用いる定義が有用であることを示した。この定義では、対象空間の大きさによらず、各時刻における速度・密度を連続値をとるように定義することができる。

(3) メッシュ区分の速度・密度の定義手法

本研究では、空間パターンの把握のために、対象空間全体の各所で速度・密度の高解像度な測定を行う。そのため、対象空間を正方形で幅 Δ のメッシュ $s = 1, 2, \dots, n$ に区切ってそれぞれの速度・密度を定義する。ここでは、人物・時刻ごとの座標 (x, y) ・速度 (v_x, v_y) ・速さ v のデータセットの存在を前提に、そこから各メッシュ s の速度 v_s ・密度 k_s を定義する手法を述べる。

各メッシュでの速度・密度の定義には、上述の Steffen が提案し Zhang が他の定義と比較しながら実験環境下で適用した、Voronoi 図を用いた手法を用いる。なお、この定義においてはメッシュ幅 Δ と、測定時間間隔を自由に設定できる。図-2 のように Voronoi 図を用いてある時刻 t におけるメッシュ s に対して速度 $v_s(t)$ と密度 $k_s(t)$ を定義する。時刻 t において各人を核とする Voronoi 図を描き、人 i が核となる Voronoi セル A_i の面積を $A_i(t)$ とする。このとき、時刻 t における人 i の速度を $v_i(t)$ とし、各点 $(x, y) \in A_i$ の速度を $v_{xy}(t) = v_i(t)$ 、密度を $k_{xy}(t) = 1/A_i(t)$ と定め、

$$v_s(t) = \frac{\iint_{(x,y) \in s} v_{xy}(t) dx dy}{(\Delta)^2} \quad (6)$$

$$k_s(t) = \frac{\iint_{(x,y) \in s} k_{xy}(t) dx dy}{(\Delta)^2} \quad (7)$$

で、メッシュ s の速度 $v_s(t)$ と密度 $k_s(t)$ を定義する。

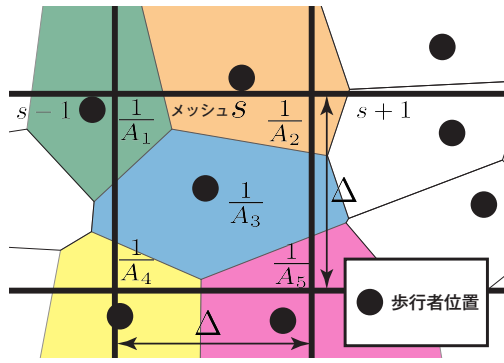


図-2 Voronoi 図を用いた密度の定義の概念図. Zhang(2011)⁸⁾の図を参考に作成.

3. 空間相関を考慮した歩行速度のモデル化

(1) 固有ベクトル空間フィルタリング

空間相関を説明する手法として、Griffith²⁾は、固有ベクトル空間フィルタリング (Eigenvector Spatial Filtering) を提案した。これは Moran の I 統計量

$$I_{\text{moran}} = \frac{n}{S_0} \frac{\mathbf{y}'(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{y}}{\mathbf{y}'(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{y}} \quad (8)$$

に基づき、(8)式における $(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)$ の固有ベクトルの線形和で空間相関を考慮する手法である。但し、 n はデータ数、 \mathbf{y} は空間相関を評価したい変数からなる $n \times 1$ の縦ベクトル、 \mathbf{I} は $n \times n$ の単位行列、 $\mathbf{1}$ は 1 を n 個並べた $n \times 1$ の縦ベクトル、 \mathbf{C} は $n \times n$ の空間重み行列、 S_0 は \mathbf{C} の全要素の和であり、 $'$ は転置を示す。 I_{moran} の値が 0 ならば \mathbf{y} に空間相関は存在せず、1 に近いほど \mathbf{y} が強い正の空間相関を持ち、-1 に近いほど \mathbf{y} が強い負の空間相関を持つことを示す。空間重み行列とは、位置情報を持つデータ同士の関係性を表した行列である。 $n \times n$ の空間重み行列 \mathbf{C} を考えるとき、地点 $i = 1, \dots, n$ のデータと地点 $j = 1, \dots, n$ のデータの依存関係の強さを \mathbf{C} の (i, j) 要素として $c_{i,j} \geq 0$ で与える。

固有ベクトル空間フィルタリングに用いられる、(8)式における $(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)$ の n 個の固有ベクトルを、固有値の大きい順に $\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_n$ とする。このとき、 \mathbf{E}_1 は最も固有値が大きい固有ベクトルであり、Moran の I 統計量で説明される最も大域的な空間パターンを表す。同様に、 \mathbf{E}_i は i 番目に固有値が大きい固有ベクトルであり、 $i - 1$ 番目までの他の全ての固有ベクトルと無相関で、かつ Moran の I 統計量で説明される、最も大域的な空間パターンを表す。

固有ベクトル空間フィルタリングの基本式は、

$$y_s = \beta_0 + \sum_i x_{i,s} \beta_i + \sum_j E_{j,s} \gamma_j + \varepsilon_s \quad (9)$$

である。但し、 s, i, j はそれぞれ地点、説明変数の番号、

固有ベクトルの番号を表す添え字であり、 y_s は地点 s の被説明変数、 $x_{i,s}$ は地点 s の i 番目の説明変数、 $E_{j,s}$ は j 番目の固有ベクトルの s 番目の要素、 ε_s は地点 s の誤差項である。 β_i, γ_j が推定するパラメータである。ここで、固有値の降順と固有ベクトルの Moran の I 統計量の降順は完全に一致するため、固有ベクトル \mathbf{E}_i とその係数として推定されたパラメータ γ_i の積 $\gamma_i \mathbf{E}_i$ が i 番目に大域的な空間パターンを表す。そして、それらの線形和 $\sum_i \mathbf{E}_i \gamma_i$ が最終的に得られる空間パターンを表す。

なお、以上の手順に用いる固有ベクトルは、(8)式における $(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{1}\mathbf{1}'/n)$ の n 個の固有ベクトル全てを投入すれば良いというものではなく、その中から有意なものを \mathbf{E}_i の Moran の I 統計量を計算する等の一定の基準を定めて選定する必要がある。

(2) 本研究の提案手法

固有ベクトル空間フィルタリングを用いて、各メッシュに対して定義された速度 v を密度 k で回帰する。回帰式は

$$v_s = f(k_s) + \sum_j E_{j,s} \gamma_j + \varepsilon_s \quad (10)$$

である。 j は n 個の固有ベクトルのうち上述の通り選定された \mathbf{E}_j の番号、 n はデータ数、 v_s, k_s, ε_s はそれぞれメッシュ $s (= 1, \dots, n)$ での速度、密度、誤差項であり、 f は回帰に際して仮定する k と v の関係式、 $E_{j,s}$ は \mathbf{E}_j の s 番目の要素、 γ_j は \mathbf{E}_j の係数パラメータである。

ここで、固有ベクトルの選定方法の他、外生的に与える設定条件である空間重み行列 \mathbf{C} 、回帰に際して仮定する式形 f 、メッシュ幅 Δ を決める必要がある。

空間重み行列 \mathbf{C} の定義には様々なものがあるが、本研究では 2 地点間の距離の逆数、その 2 乗、2 つのメッシュが辺を共有していれば 1、そうでなければ 0 とするもの (チェスの駒の動きをもとに Rook 型と呼ばれる)、Rook 型に加えて 2 つのメッシュが頂点を共有している場合も 1 とする Queen 型の 4 種類を検証した。

回帰する際に仮定する式形 f は、(2) 式のような Greenshields による一次式、(4) 式のような Greenberg による対数関数、(5) 式のような三角形基本図を基にした定数の 3 種類を検証した。即ち、 $f(k)$ は以下のようなになる。

$$f(k) = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 k & \text{Greenshields} \\ \beta_0 + \beta_1 \ln k & \text{Greenberg} \\ \beta_0 & \text{Triangle} \end{cases} \quad (11)$$

メッシュ幅 Δ は、1[m] と 2[m] の 2 種類を検証した。

固有ベクトルのうち採用するもの \mathbf{E}_j の選定方法は以下の通りである。まず、Griffith(2005)⁹⁾を参考に \mathbf{E}_i の Moran の I 統計量の値が 0.25 以上の固有ベクトルを

抽出し、それら全てを (10) 式に用いて β, γ を最小二乗推定し、各推定量に対する p 値を求めた。そして、係数パラメータ γ_j の p 値が 0.1 以下である、即ち有意水準 10% 以下で有意である固有ベクトル E_j のみを残した。こうして選定した固有ベクトル E_j を (10) 式に用いて、残差の 2 乗和が最小となるような β, γ を推定したものを、最終的な推定結果とした。

設定条件による回帰モデルの有用性の差を比較するための指標としては、赤池情報量規準 (Akaike's Information Criterion: AIC) を用いた。

以上の手法では、(10) 式の推定量 β, γ に加えて、 v の空間パターンも得られている。即ち、各メッシュ s における $E_{j,s}\gamma_j$ の値を全メッシュ s について並べて示したものが、固有ベクトル E_j に対応する空間パターンを表している。そして、それらの線形和 $\sum_j E_{j,s}\gamma_j$ が、最終的に得られる空間パターンである。 $\sum_j E_{j,s}\gamma_j > 0$ であるようなメッシュ s の密度が k_s のとき、本手法で推定される速度 v_s は推定された $k - v$ 関係式だけから求められる値 $f(k_s)$ よりも大きい傾向にあり、逆に $\sum_j E_{j,s}\gamma_j < 0$ であるようなメッシュ s では同じ密度 k_s であっても推定される速度 v_s は $f(k_s)$ よりも小さい傾向にある、ということを示す。

4. 適用結果と考察

(1) 対象データと設定条件

本研究では、「川崎駅前東」交差点の横断歩道で撮影した連続画像を、図-3 のように座標を設定して使用した。横断歩道という特性上、歩行者の向きは概ね双方向流である。設定条件は、空間重み行列についてメッシュ中心間距離の逆数型・メッシュ中心間距離の逆数 2 乗型・Rook 型・Queen 型の 4 種類、回帰式形について Greenshields・Greenberg・Triangle の 3 種類、メッシュ幅について 1[m] と 2[m] の 2 種類の、全 24 種類を検証した。なお、1[m] メッシュのデータ数は 18424、2[m] メッシュのデータ数は 11466 であり、測定時間間隔は 1[s] とした。



図-3 座標設定

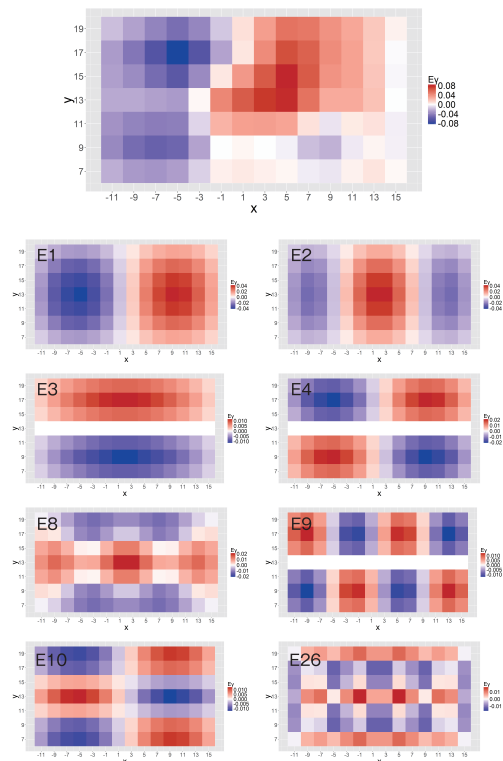


図-4 2m メッシュ/Rook/Greenshields での空間パターンの推定結果

(2) 推定結果

24 種類の設定条件全てにおいて、空間相関を考慮する本研究での提案手法は、通常回帰よりも AIC の値が小さく、回帰精度が良かった。このことは、提案手法が設定条件によらず通常回帰よりも優れたモデルを与えることを示している。

2m メッシュの 12 種類の設定条件のうち、AIC が最小となった空間重み行列 Rook 型・回帰式形 Greenshields でのパラメータ推定結果を表-1 に、得られた空間パターンを図-4 に示す。表-1 は通常回帰と本研究での提案手法による回帰の結果を比較し、それぞれのモデルにおける残差の 2 乗和、AIC の値、各推定量の値とその t 値を示したものである。固有ベクトル E_j の係数 γ_j は、この設定条件で本研究の手法により選定されたもの、即ち有意水準 10% 以下で有意であるものを掲載している。図-4 は、選定された固有ベクトルと推定された係数 γ の積 $E_j\gamma_j$ と、それらの線形和それぞれの空間パターンを表す。

(3) 空間パターン

図-4 に、空間内各所の局所的な状態がメッシュ状に表された空間パターンとして得られるという、本研究の手法の大きな特徴が示されている。最も大域的な空間パターンを固有ベクトル E_1 が表し、比較的局所的な空間パターンを固有ベクトル E_{26} が表すこともこの

表-1 パラメータ推定結果. 通常の回帰と本研究での提案手法による回帰の結果を比較している. 設定条件は, 空間重み行列が Rook 型, 回帰式形が Greenshields, メッシュ幅が 2m である.

	通常回帰		提案手法	
	$v_s = \beta_0 + \beta_1 k_s + \varepsilon_s$		$v_s = \beta_0 + \beta_1 k_s + \sum_j E_{j,s} \gamma_j + \varepsilon_s$	
残差の 2 乗和	1915.75		1901.31	
AIC	12029.24		11958.48	
パラメータ (説明変数)	パラメータ推定量	t 値	パラメータ推定量	t 値
β_0 (定数項)	1.49	337.14 ***	1.49	334.45 ***
β_1 (密度 k)	-0.56	-9.57 ***	-0.69	-11.04 ***
γ_1 (第 1 固有ベクトル E_1)			-2.53	-6.20 ***
γ_2 (第 2 固有ベクトル E_2)			-2.02	-4.81 ***
γ_4 (第 4 固有ベクトル E_4)			1.22	3.00 **
γ_8 (第 8 固有ベクトル E_8)			0.93	2.27 *
γ_{26} (第 26 固有ベクトル E_{26})			0.82	2.02 *
γ_3 (第 3 固有ベクトル E_3)			-0.70	-1.69 .
γ_9 (第 9 固有ベクトル E_9)			0.77	1.89 .
γ_{10} (第 10 固有ベクトル E_{10})			0.76	1.86 .

***: 0.1%有意 ** : 1%有意 * : 5%有意 . : 10%有意

図から読み取れる. また, これらの線形和であるで表された空間パターンからは, x 座標が小さい側が速度が遅く大きい側は速くなり易いという大域的なパターンと, $x = 8[m], y = 9[m]$ 付近に周囲よりも遅くなり易い箇所があるという局所的なパターンが読み取れる.

まず, 大域的な空間パターンについて述べる. 各設定条件を比較すると, 空間重み行列や回帰式の形に依らず, 全体的に左側に速度が遅い傾向にあるメッシュが, 右側に速度が速い傾向にあるメッシュがあるという大域的なパターンが見られる. 左側は横断歩道の先の歩道が高架下に位置していて狭い一方で, 右側はショッピングセンター前の比較的広い歩道になっていることがその原因と考えられる. 左側では, 横断歩道からそれより狭い場所へと移動する際に, 同じ密度であっても速度が低下し, 逆に右側では横断歩道からそれより広い場所へと移動するに伴って, 同じ密度でも速度が上昇する可能性がある. また, その他の原因として考えられるのは, 以下のような座標変換に際する誤差である. 今回のデータセットは画像に手で点を打ち, 画像座標を実平面座標に変換している. カメラが横断方向に対して非対称な向きで撮影されていることから, 横断歩道上の位置によって座標変換に際するレンズ歪みの影響の大きさや向きが異なる. そのため, この違いが空間相関として現れてしまう可能性がある.

次に, 比較的局所的な空間パターンについて述べる. 空間重み行列の形状により若干位置が異なるが, 右下の $x = 8[m], y = 9[m]$ 付近に, 周りより遅い箇所が見

られることがわかる. この付近は右側の歩道から少し横断歩道上へ出始めた箇所であり, 駅へ向かう人が歩道上に密集した結果であると考えられる.

(4) 設定条件による違いの考察

a) 空間重み行列による違い

AIC の値が最小となるのは 1m メッシュでは距離逆数 2 乗型, 2m メッシュでは Rook 型と, メッシュ幅による違いが見られた. この原因については, 以下のように考えられる. 実際に人混みを歩行することを想定したとき, 自分の速度を制御する要因は, 他人がどこ(どの方向, どれくらいの距離)にいるかである. このとき, 前や真横に人がいれば, 斜めにいるときに比べて自分の速度は大きく制約を受ける. したがってこれを上手く説明する Rook 型の精度が良い. 一方で Rook 型は, 隣接したメッシュ以外は全く参照しない. このため, 1m までメッシュが細くなると, 距離 2 乗型の方が上手くあてはまるようになる.

得られる空間パターンは, 空間重み行列に依らず似たパターンとなることがわかった. しかし, 図-5 のように 1m メッシュの距離逆数型が他の 3 種に比べて簡単なパターン境界になっている等, 細かい相違は見られるため, その理由については今後精査する必要がある.

b) 回帰式形による違い

今回の例では, どのメッシュ幅・どの空間重み行列・どのデータにおいても, AIC の値が最小なのは Greenshields

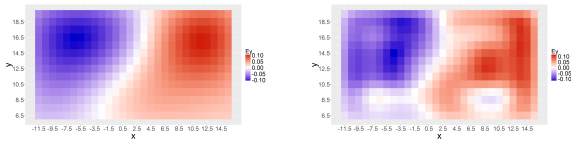


図-5 1m メッシュGreenshields の式形で、距離逆数型 (左) と Rook 型を比較したもの

であった。Greenshields の式と他の 2 式では、密度が大きいほど推定する速度に大きな違いが出る。このため、どれくらいの密度の点が多く見られるかというデータの特性に応じて、適切な式形を選択する必要があると考えられる。なお、同じメッシュ幅・同じ空間重み行列で見た場合、回帰式の形を変えても、有意な固有ベクトルの番号はあまり変化しない。また、得られる空間パターンも回帰式には殆ど依存しない。

c) メッシュ幅による違い

注意を要する点として、データ数が異なるので AIC の値は比較できない。このためメッシュ幅の違いによる回帰精度の良し悪しについては議論せず、空間パターンの違いを見る。最大の違いは、1m メッシュだと空間相関が強いことである。E γ は 2m メッシュでは 0.05[m/s] 前後であるが、1m メッシュでは軒並み 0.1[m/s] 程度である。1m メッシュではあるメッシュが次の時刻にも引き続き同じ人物の Voronoi セルに含まれている割合が高いため空間相関が強くなる、と考えられる。

空間パターンの形状については、本研究においては、どの空間重み行列・どの回帰式でも、メッシュ幅に依らずほぼ同じパターンが得られた。しかし、Queen 型や Rook 型はメッシュ幅によって考慮する範囲が変わってくるため、これらの空間重み行列を採用する際には、メッシュ幅の影響も同時に考える必要があるだろう。また、1m メッシュの場合、Rook 型と Queen 型が AIC の値も空間パターンも図-6 の通り似ていることがわかった。

(5) 空間評価への考察

得られた空間パターンを見ると、同じ対象空間を評価しようとした場合でも、対象空間全体を一つの回帰式だけで評価する従来の手法と、本研究での提案手法では結果が大きく異なることがわかる。使用したデー

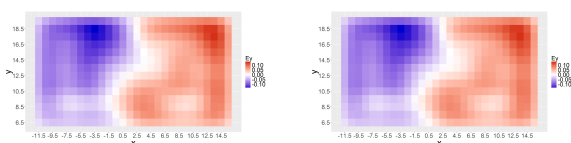


図-6 1m メッシュGreenberg の式形で、Rook 型 (左) と Queen 型を比較したもの

タでは歩行者の速度は 1-2[m/s] 程度であるが、空間内の位置に応じた空間相関項の値の差は 0.1-0.2[m/s] 程度で、速度の 1 割程度にまで達する。一例として、従来の手法の測定箇所が、本研究での空間パターンが赤い部分で得られたような箇所だったとしよう。この場合の推定結果とそれに基づく予測モデルでは密度を過小評価することになり、その結果を対象空間全体に適用すれば、特に青い部分において評価が実態と乖離してしまう。本研究の手法は、このような事態に陥ることなく、空間内各所の局所的な状態把握を含めたより正確な空間評価が可能である。

5. おわりに

本研究では、対象空間内各所の局所的な状態の把握が望まれることを踏まえ、これを空間パターンとして推定する方法を検討し、得られた空間パターンの解釈による、歩行空間のより詳細な性能・状態評価の可能性を示唆した。具体的には、対象空間をメッシュ状に区切り、各メッシュで連続的な値をとる速度・密度を定義した。それらに固有ベクトル空間フィルタリングを適用し、回帰精度の向上を確かめた他、対象空間内各所の局所的な状態を表す空間パターンを推定する手法を開発した。

今後は、速度の定義の拡張や非線形回帰に対する空間相関項の組込によって、多方向流や渋滞流へも対象を拡大して多様なデータへの適用を行うことが望まれる。また、メッシュ幅と Voronoi セルの大きさの関係を踏まえた速度の定義や測定時間間隔の調整、空間重み行列の選定手法の開発なども課題である。更に、得られた空間パターンから実用に繋がる空間評価を得るためのパターンの特徴抽出方法や、その特徴を示す空間上の要因の同定手法も望まれる。

謝辞: 東京大学の井料美帆准教授および川崎モアーズ様には、歩行者データの取得にあたりご協力を頂いた。また、国立環境研究所の村上大輔氏には、固有ベクトル空間フィルタリングの実装に関して有益なご助言を頂いた。なお、本研究は科学研究費(若手研究 B:15K18131)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) John J. Fruin. Designing for pedestrians: A level-of-service concept. new york metropolitan association of urban designers and environmental planners. *Highway Research Record*, No. 355, 1971.
- 2) Daniel A. Griffith. Spatial autocorrelation and eigenfunctions of the geographic weights matrix accompanying geo-referenced data. *Canadian Geographer*, Vol. 40, No. 4, p. 351, 1996.
- 3) B. D. Greenshields, W. Channing, H. Miller, et al.

- A study of traffic capacity. In *Highway Research Board Proceedings*, Vol. 1935. National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935.
- 4) Harold Greenberg. An analysis of traffic flow. *Operations Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 79–85, 1959.
 - 5) Anders Johansson. Constant-net-time headway as a key mechanism behind pedestrian flow dynamics. *Physical Review E*, Vol. 80, No. 2, p. 026120, 2009.
 - 6) Armin Seyfried, Bernhard Steffen, Wolfram Klingsch, and Maik Boltes. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2005, No. 10, p. P10002, 2005.
 - 7) Bernhard Steffen and Armin Seyfried. Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 389, No. 9, pp. 1902–1910, 2010.
 - 8) Jun Zhang, Wolfram Klingsch, Andreas Schadschneider, and Armin Seyfried. 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.
 - 9) Daniel A. Griffith. *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering: Gaining Understanding Through Theory and Scientific Visualization*. Springer, 2003.

(2016. 4. 22 受付)

Analysis on Spatial Pattern of Walking Speed for Pedestrian Space Evaluation

Yoshiaki FUKUTOMI, Wataru NAKANISHI and Takashi FUSE