

居住者の時空間分布に基づく地域間距離の都市モデルへの適用

村上 彩夏・大佛 俊泰

Distance Measure Based on Spatiotemporal Distribution of Inhabitants and Its Application to Urban Models

Ayaka MURAKAMI and Toshihiro OSARAGI

Abstract : Distance measures, such as Euclid-distance, network-distance, and time-distance, have been used for various urban models. In this paper, we proposed a novel distance measure based on the spatiotemporal distribution of inhabitants estimated by person trip survey data, and applied it to population density function and spatial interaction model. The results of some numerical analyses using actual data demonstrated that proposed distance measure can be of great value in being incorporated in urban models.

Keywords : 地域間距離 (distance between areas), 距離尺度 (distance measure), 時空間分布 (spatiotemporal distribution), ジエンセン・シャノン・ダイバージェンス (Jensen-Shannon Divergence), パーソントリップ調査 (person trip survey), クラスター分析 (cluster analysis), 空間相互作用モデル (spatial interaction model)

1. はじめに

従来まで、ユークリッド距離・ネットワーク距離・時間距離などの物理的な距離が、地域間の距離を表す指標として多くの都市モデルで用いられてきた。近年、交通網の発達により人々のモビリティは高まり、遠く離れた地域間でも人的交流が活性化している。

そこで、筆者らは居住者の時空間分布に着目し、居住地の異なる人々が同一時刻・同一地域に滞留すること、すなわち、居住者間の遭遇機会の程度に基づき地域間の距離（以下、地域間距離）を定義し、これを用いて都市空間分析を試みた（村上・大佛、2012；村上・大佛、2013）。本稿では、この地域間距離を人口密度関数や空間相互作用モデルなどの都市モデルに組み込み、地域間距離の適用可能性について検討する。

村上彩夏 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学大学院 情報理工学研究科

情報環境学専攻 大佛研究室

E-mail: murakami.a.ad@m.titech.ac.jp

2. 居住者の時空間分布に基づく地域間距離

2. 1 地域間距離の定式化と計算方法

居住者の時空間分布を仔細に観察すると、居住地の異なる人々の空間分布は重なり合うことがわかる（図1）。空間分布の重なりは居住地の異なる居住者が同一時刻・同一地域に滞留していることを示している。こうした人々は相互に関連を持

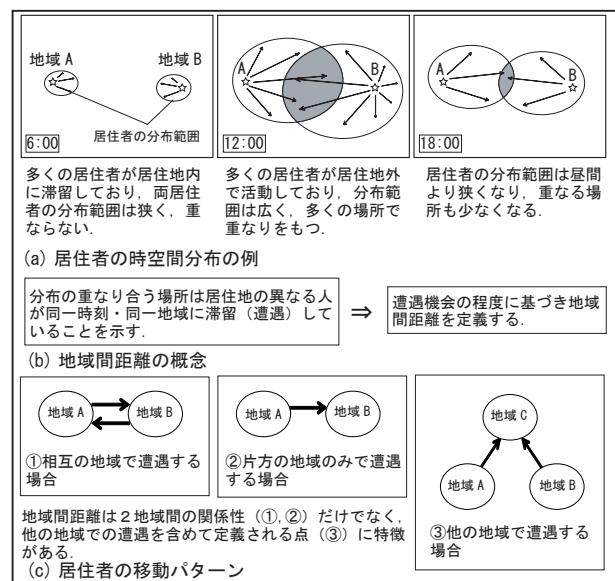


図-1 地域間距離の概念

つ活動を行っている可能性が高く、社会的な関係性は相対的に密接であると考えられる。そこで、前稿（村上・大佛, 2012）では、居住者の時空間分布をもとに地域間距離を定義した。

具体的には、居住者の時刻別の空間分布を確率分布ととらえ、2つの確率分布の類似・非類似の距離測度を表す Jensen-Shannon Divergence（以下、JSD）を用いて地域間距離を計測した。

しかし、JSDの値をそのまま用いた定義では、距離の公理（図2(b)）のうち、(D3)を満足していない。ここで、Endres and Schindelin (2003)によれば、JSDの値の平方根は距離の公理をすべて満足することが知られている。そこで、本稿ではJSDの値の平方根を用いて地域間距離を再定義することとした（図2(a)）。

以下では、平成20年東京都市圏パーソントリップ調査のデータ（以下、PTデータ）を用いて、人々の時刻別（7～19時）、地域別の滞留者数を求め、時空間分布を抽出する。さらに、前稿までは地域内に滞留している人のみを分析対象としていたが、本稿では移動者についても考慮し、地域間距離を算出する（図2(c)）。

2.2 地域間距離の性質

表1に地域間距離の性質を示してある。地域間距離は従来までの距離概念と類似する性質を備えながらも異なる特徴を備えていることが、これまでにってきた分析からわかっている。新しく定義した地域間距離においても同様の性質を備えている。

ここで、各地域からその他の地域の地域間距離の平均値を求め空間分布をみると（図3(a)）、平均値が小さいものから順に東京都23区を中心に同心円状に広がっている様子がわかる。平均値の小さい地域の上位はすべて東京都心部に存在する（図3(b)）。平均値が小さいことは他の多くの地域までの地域間距離が小さいことを示しており、すなわち、都心部までの距離に相当する指標と考えることができる。

地域*i*の居住者数を*N_i*で表す。また、地域*i*の居住者のうち、時刻*t*において地域*k*に滞在している人数を*n_{ik}(t)*と表す。地域*i*の居住者の時刻*t*別、地域*k*別の確率分布*p_{ik}(t)*は次式で与えられる。

地域*j*についても同様に定義することができる。ただし、地域*i*と明確に区別するため、*q_{jk}(t)*と表記することにする。

$$p_{ik}(t) = \frac{n_{ik}(t)}{N_i} \quad q_{jk}(t) = \frac{n_{jk}(t)}{N_j}$$

ここで、地域*i*と地域*j*の居住者が同一時刻*t*・同一地域*k*で遭遇する機会の程度について考えると、この問題は時刻*t*別、地域*k*別の確率分布*p_{ik}(t)*、*q_{jk}(t)*の類似・非類似について考えることと等価である。そこで地域間距離を、2つの確率分布の距離測度を表すJSDの平方根を用いて、次式のように定式化する。

$$D_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left[2p_{ik}(t) \log_2 \frac{2p_{ik}(t)}{p_{ik}(t) + q_{jk}(t)} + q_{jk}(t) \log_2 \frac{2q_{jk}(t)}{p_{ik}(t) + q_{jk}(t)} \right] \right]$$

この式の計算過程において、*p_{ik}(t)=0*または、*q_{jk}(t)=0*の扱いが問題となるが、 $\lim_{p \rightarrow 0} p \log p = 0$

の関係を利用すればよい。

(a) 地域間距離の定式化

- (D1) $d(x,y) \geq 0$, $d(x,y)=0 \Leftrightarrow x=y$
 (D2) $d(x,y)=d(y,x)$
 (D3) $d(x,z) \leq d(x,y)+d(y,z)$

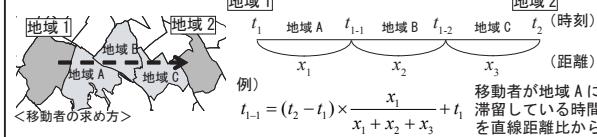
xy間の距離を*d(x,y)*とおくと、距離の公理は左のよう

に表せる。

地域間距離*D_{ij}*は(D1)、(D2)を満足することは自明である。理論上(D3)も満足することが知られていることから(Endres and Schindelin, 2003)、距離と呼ぶにふさわしい指標であることがわかる。

(b) 距離の公理

平成20年東京都市圏パーソントリップ調査 \Rightarrow 7時から19時まで時刻別、地域別に移動者を含めた滞留者を抽出する。 \Rightarrow 定義式に従い、地域間距離を算出する。

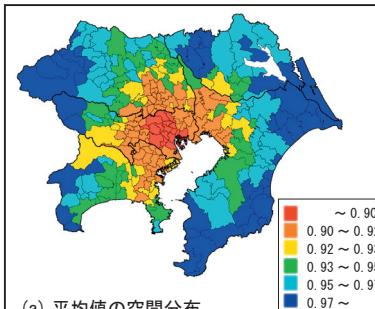


(c) 地域間距離の計算方法

図-2 地域間距離の定式化・計算方法

表-1 地域間距離の性質

分析方法	結果
①移動パターンとの関係	地域間距離は相互移動（図1(c)①）に大きな影響を受ける
②従来の距離概念との関係	地域間距離が近隣の地域だからといって必ずしも小さいわけではない
③空間分布	地域間距離の値は人々の空間移動の方向性に影響を受ける
④年次比較	地域間距離は交通網の発達によるモビリティの高まりにより小さくなる



順位	名前	平均値
1	港区	0.8879
2	新宿区	0.8886
3	渋谷区	0.8899
4	豊島区	0.8920
5	中央区	0.8923
6	世田谷区	0.8927
7	中野区	0.8938
8	杉並区	0.8939
9	文京区	0.8949
10	目黒区	0.8951

(b) 平均値の順位と名称

図-3 地域間距離の平均値

3. 地域間距離を用いた地域分類

本稿で改めて定義した地域間距離を用いて、地域分類を行った。具体的には、クラスター分析（ウォード法）で首都圏全体および東京都23区をそれぞれ15個に分類した。

地域間距離には、行政界の情報は一切含まれていないにも関わらず、分類されたクラスター境界

の多くが県境や区境などの行政界と一致していることがわかる(図4(a)).これは、行政界にある大きな河川等の地理的障害が人々の空間移動を規定しているためと考えられる。

同様に、東京都23区の分類結果も、多くのクラスター境界が区境と一致していることを示している(図4(b)).詳しくみると、多くは鉄道路線域によってクラスターが構成されていると考えられる。

これらの結果は、人々の都市内移動が路線域や地理的障害に規定され、ひいては地域間距離の値に影響を及ぼしていることを示唆している。

4. 人口密度関数への応用

人口密度を都心からの距離の指數関数で表したモデル式(Clark式)に、皇居からの直線距離と地域間距離の平均値 D_i を適用した。人口密度の推定結果と実際の値を比較した(図5(a), 図5(b)).その結果、皇居からの直線距離を適用した場合よりも、地域間距離の平均値 D_i を適用した場合の方が適合性が高いことが判明した。すなわち、地域間距離の平均値は都心からの距離を表す新たな指標として活用できる可能性がある。

5. 空間相互作用モデルへの応用

空間相互作用モデルの概要および適合度指標を図6に示してある。空間相互作用モデルにおいて自地域内の距離 C_{ii} が0であると、相互作用がうまく記述できないことが知られている(Bharat and Larsen, 2011).そこで、自地域内の距離 C_{ii} の値は0とせず、未知パラメータ C_o を用いて記述し、空間相互作用モデルの推定を行った(図6(b)).具体的には、非類似性指数 D の値が最小となるように C_o の値を推定した。

次に、地域 ij 間の距離 C_{ij} を直線距離にした場合と地域間距離 D_{ij} に置き換えた場合を比較した。適合度指標、および、推定したトリップと実際のトリップの関係をみると、地域 ij 間の距離に地域

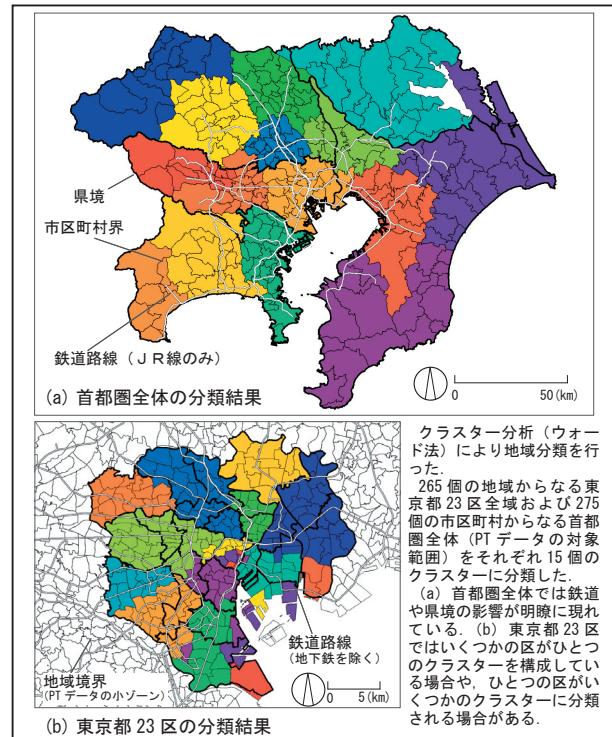


図-4 地域間距離を用いた地域分類

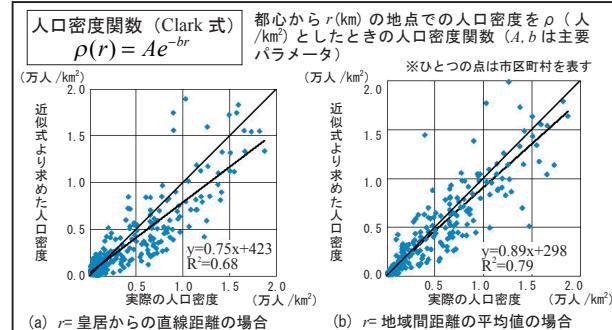


図-5 人口密度関数への応用

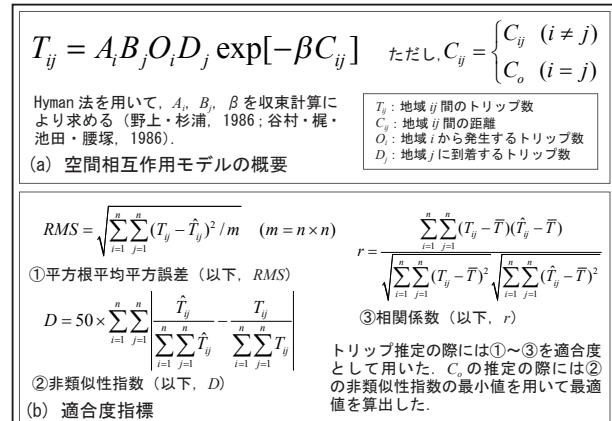


図-6 空間相互作用モデルの概要

間距離を適用した方が適合性が高い(図7(a)).すなわち、地域間距離の方が直線距離よりも地域間の相互作用を記述する上でふさわしい距離指標となっていると言える。

同様に目的別のトリップを用いて推定した。目的別のトリップについても良好に記述できることがわかる(図7(b))。距離抵抗を表す β の値をみると、トリップの目的に応じた特徴が現れている。例えば、通勤や通学目的では β の値が小さく、人々が遠くまで移動していることがわかる。一方で、買い物や送迎目的では β の値が大きく、近い場所での移動が多い様子が現れている。

さらに、 β の平均値を基準にした β の値を直線距離と地域間距離で比較すると、ほとんどの目的において同様の傾向を示すものの、通学目的については直線距離と地域間距離の差が大きい(図7(c))。これは、通学は通勤と同様に遠くへ移動する傾向がありながらも、通勤より地域間距離の短い地域へ移動していることを示唆している。一方、買い物や送迎などは、地域間距離よりも直線距離の影響をより強く受ける移動であると考えられる。

6. 空間相互作用モデルにおける地域間距離

空間相互作用モデルとロジットモデルは数学的には等価であることから(青木・大佛, 1993; 図8(a)), 空間相互作用モデルにおける距離 C_{ij} の値は相互作用の量をもとに逆推定することができる。空間相互作用から逆推定した距離 C_{ij} と直線距離 X_{ij} 、地域間距離 D_{ij} の関係をみると、地域間距離 D_{ij} の方が直線距離 X_{ij} よりも高い相関関係が認められた(図8(b))。距離 C_{ij} と地域間距離 D_{ij} の間には理論上の関係性は見出し難いが、データ上は良好に対応する関係があることがわかる。

7. まとめ

居住者の時空間分布の重なりをもとに定義した地域間距離を都市モデルに応用し、従来から用いられてきた直線距離よりも高い記述力があることを示した。本稿で定義した地域間距離は、従来とは異なる視点から地域構造を読み解くための距離指標として活用できる可能性を示した。

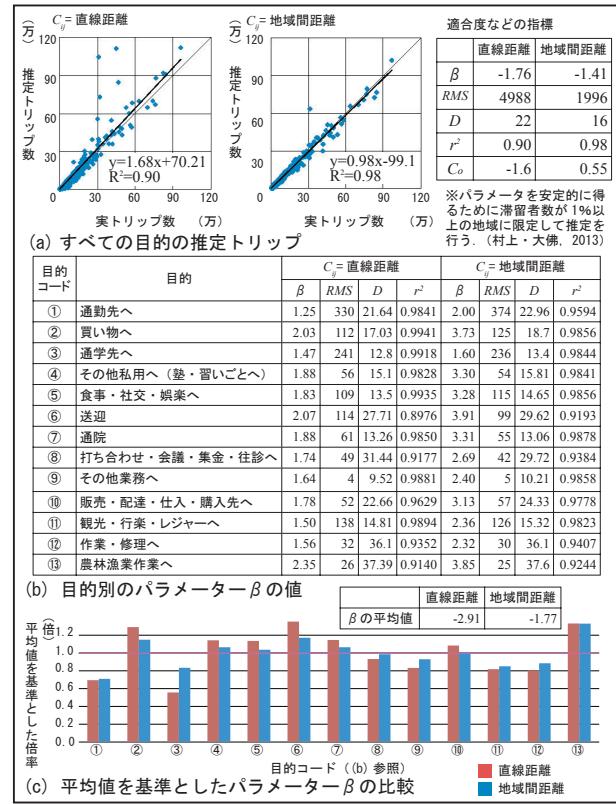


図-7 空間相互作用モデルへの応用

地域 i の居住者が地域 j を選択確率を P_{ij} 、そのことによって得られる効用を U_{ij} 、距離を C_{ij} とすると、ロジットモデルは次式で表すことができる。

$$P_{ij} = \frac{\exp[U_{ij}]}{\sum_k \exp[U_{ik}]} \quad \dots (1), \quad U_{ij} = U_j - C_{ij} \quad \dots (2)$$

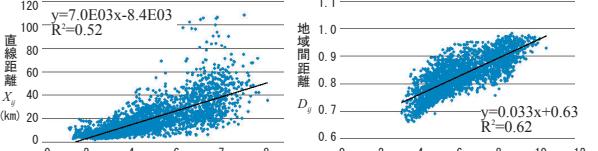
ここで、(2)の仮定のもとでは、ロジットモデルは空間相互作用モデルと等価となる(青木・大佛, 1993)。

$$T_{ij} = O_i P_{ij} = \frac{1}{\sum_k \exp[U_k] \exp[-C_{ik}]} \cdot O_i \cdot \frac{\exp[U_j]}{d_j} \exp[-C_{ij}] = A O_i B_j D_j \exp[-C_{ij}]$$

さらに、選択確率の比 Q_{ij} を求め、以下の(i),(ii)の仮定をおくと、地域間距離 C_{ij} は Q_{ij} を用いて記述することができる。

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= \frac{P_{ij} \cdot P_{ji}}{P_{ii} \cdot P_{jj}} \\ &= \exp[(C_{ii} - C_{ij}) + (C_{jj} - C_{ji})] \quad (\because C_{ii} = C_{jj} = C \quad \dots (i)) \\ &= \exp[2C - C_{ij} - C_{ji}] \quad (\because C_{ij} = C_{ji} \quad \dots (ii)) \\ &= \exp[2C - 2C_{ij}] \\ C_{ij} &= -\frac{1}{2} \log Q_{ij} + C \end{aligned}$$

(a) 空間相互作用モデルにおける距離の推定方法



(b) 直線距離と地域間距離の比較

※パラメータを安定的に得るために滞留者数が1%以上の地域に限定して推定を行う。

図-8 空間相互作用の距離 C_{ij} と地域間距離 D_{ij} の関係

- 参考文献
- 村上彩夏・大佛俊泰(2012)：居住者の時空間分布からみた地域間距離、地理情報システム学会講演論文集(CD-ROM), 21, f5-1.
 - 村上彩夏・大佛俊泰(2013)：社会距離の都市モデルへの適用、日本建築学会大会学術講演梗概集(CD-ROM), 7501.
 - Dominik M. Endres and Johannes E. Schindelin, 2003. A New Metric for Probability Distributions, *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, 49, 7.
 - P.B. Bhargava and O.I. Larsen, 2011. Are intrazonal trips ignorable?, *Transport Policy*, 18, 13-22.
 - 野上道男・杉浦芳夫(1986)：パソコンによる数理地理学演習、古今書院, 137-185.
 - 谷村秀彦・梶秀樹・池田三郎・腰塚武志(1986)：都市計画地理、朝倉書院。
 - 青木義次・大佛俊泰(1993)：ロジットモデルと空間影響モデルを連動した居住地選択行動モデル、日本建築学会計画系論文集, 444, 97-103.