

平成21年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18310101

研究課題名（和文）非対称地理データの分析とその視覚化

研究課題名（英文）Analysis and Visualization of Asymmetric Geographical Data

研究代表者

山本 芳嗣（YAMAMOTO YOSHITSUGU）

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授

研究者番号： 00119033

研究成果の概要：

地理データは市町村、建造物等を対象とし、それぞれの対象に付随するデータと対象相互の関連を示すデータからなっている。後者には、通勤データ、物流データなどのように非対称性をもったものが多数存在する。この非対称性を反映した対象の相互関係の視覚化方法の提案を行った。また、対称相互の関係がグラフ構造で与えられている場合の対称の重要度を表す指標を提案し、その妥当性をゲーム理論を用いて保証した。さらに、データ間の距離として有用な Earth Mover's Distance の効率的な計算法補を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	5,800,000	1,740,000	7,540,000

研究分野：数理工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：数理工学，アルゴリズム，交通工学，地理情報システム

1. 研究開始当初の背景

都市計画の策定段階で地理情報を関係者が理解しやすい形で提示することは、議論を促進し、結果に対する理解を得るために配慮すべき重要な留意点である。そのための有用な手段として視覚化が考えられる。しかし時間空間移動データとしてしばしば現れる対称性のないデータを多次元尺度法などの既存の多変量解析の手法を援用して視覚化する場合に、千野[1]などが提案している少数の

手法を除けば、データの持つ非対称性を無視することを余儀なくされていた。そもそも対象間の「距離」や「類似度」といった対称なデータが得られていることを前提にモデルが作られているのがその理由である。また、「距離」や「類似度」の定義もデータの性質や分析目的に応じて工夫しなければならないことは言うまでもない。数学で定義された距離やノルムを単純に援用するだけでは、データに有用な構造を見つけ出すことはできない。

[1] 千野直仁 (1997)『非対称多次元尺度構成法』現代数学社

2. 研究の目的

研究目的は以下の3点である.

(1) 地点間の通勤人口, 電話のコール数, 貨物輸送などの対称性を持たない空間移動データを何らかの形で視覚化する手法を開発することが目的の一つである. ここで, 視覚化すべき対象は市町村とその相互関係である.

(2) さらに, これらの対象間の隔たりを測る「距離」あるいは「類似度」としてどのような尺度が好ましいかを見定め, その実用的な計算方法を開発する.

(3) 都市群間の関係をグラフ構造で表現し, その代数的構造から都市の重要性を算出する問題に対して, グラフ理論とゲーム理論の両者から分析を試みる.

3. 研究の方法

上記の目的それぞれについて研究方法を説明する.

(1) 非対称データの視覚化

国勢調査の従業地・通学地集計の「常住地による従業・通学市区町村, 男女別 15 歳以上就業者数及び 15 歳以上通学者数」[2]に見られるように, 市町村 i から市町村 j への通勤通学者数を $c[i,j]$ と j から i への通勤通学者数 $c[j,i]$ は等しくない. このようなデータから相互に通勤通学者数の多い市町村が近くに置かれ, かつ, 通勤通学者数の非対称性による市町村間の順位関係が明瞭になるように地図を描こうとすると, 多次元尺法は適当でない. この研究では上記の $c[i,j]$ が

$$c[i,j] = \sigma(x[i,1], x[i,2], x[j,1], x[j,2]) + \tau(y[i], y[j]) + \varepsilon[i,j]$$

と表せるとの統計モデルを立て, 右辺の誤差項 $\varepsilon[i,j]$ の 2 乗和の最小化問題を解くことによって, 最適な 2 次元布置 $(x[i,1], x[i,2])$ と 1 次元布置 $y[i]$ を求め, 両者を合わせて 3 次元の布置 $(x[i,1], x[i,2], y[i])$ を得る. 関数 σ と τ についての説明は省略する. 解くべき最小化問題は非線形な最適化問題となり, 良好な解を得るには, 解法の選択, 初期点と終了

判定の設定などの問題点がある. さらに, 出力された布置が実際の市町村の位置から大きくかけ離れることを防ぐために制約をいくつか追加する. 例えば, 市町村 i を中心にして時計回りに市町村 j, k の順で位置しているなら, 得られる布置でもその位置関係を維持するとの制約を付加するのが好ましいが, この制約本数の増加を防ぐためにドロネ三角形グラフを作成し, このグラフ上で隣接する市町村間だけに制約を付加することにする.

(2) データにふさわしい距離の定義とその計算方法

自動改札機から得られる駅の利用者データにはどの駅の間を通勤者がどの程度あったかの情報は含まれていないが, 背後に通勤による流動があることを仮定して複数の駅のデータに対して整合性を持った解釈を与えることが可能である. その際, 2 つの駅の利用者推移データ間の距離をこの目的に即して定義する必要がある. 田村一軌(鉄道総合技術研究所)はこの問題に対して **Earth Mover's Distance** (以降 **EMD** と略す)を利用して成果を上げている. 一方, 画像データ間の距離としても **EMD** が有効であることは広く知られていたが(例えば[3]), $m \times m$ ピクセルの画像データ間の **EMD** を計算するには m の 4 乗に比例する個数の変数を持つ最適化問題を解く必要がある. これに対して[4]ではピクセル間の距離を **L1** 距離で測る場合には問題の縮小が可能であることを示している. 本研究では, ピクセル間距離が **L1** 以外の場合に同様に問題規模の縮小を目指す.

(3) グラフ構造からの重要度の算定

市町村などの地理上の対象の隣接関係を無向グラフに表現し, その隣接行列を $A=(a[i,j])$ とする. $a[i,j]$ は対象 i と対象 j が隣接しているときに 1 で, それ以外は 0 である. この隣接行列を用いて対象の重要度を算出する試みでは, 行列 A の主固有ベクトルが用いられる. これは **Analytic Network Process** (以下 **ANP** を略す)と同様の考えに基づく. 例えば[5]参照. しかし, この方法はいくつかの不都合な結果をもたらすことが指摘されている. その一つの理由は, 行列 A を加工して得られる推移確率行列をもつマルコフ連鎖に対して, この主固有ベクトルが定常分布となっていることによる. この問題点を解決するためにゲーム理論的なアプローチをとる. すでに[6]にいくつかの提案とそのゲーム理論的合理化と公理化が試みられているが, 新たにいくつかの重要度を示す指標の概念を提案し, その合理化をと公理化を試みる.

- [2] <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/jutsu1/08/index.htm>
- [3] Y. Rubner, C. Tomasi and L.J. Guibas, "The earth mover's distance as a metric for image retrieval," *International Journal of Computer Vision* 40, 99-121, 2000.
- [4] H. Ling and K. Okada, "An efficient earth mover's distance algorithm for robust histogram comparison," *IEEE Trans on Pattern Anal. and Mach. Intell. (PAMI)*, 29, 840-853, 2007.
- [5] K. Genma, Y. Kato and K. Sekitani, "Matrix balancing problem and binary AHP," *Journal of the Operations Research Society of Japan* 50, 515-539, 2007.
- [6] P. Borm and R. van den Brink and M. Slikker, "An iterative procedure for evaluating digraph competition," *Annals of Operations Research*, 109, 61-75, 2002.

4. 研究成果

(1) 非対称データの視覚化

3 (1) で説明したモデルと国勢調査の従業地・通学地集計の「常住地による従業・通学市区町村, 男女別 15 歳以上就業者数及び 15 歳以上通学者数」[2]のデータを用いて, 茨城県の市町村の 3 次元布置を計算した. 解くべき最適化問題の構造に扱いやすい性質 (例えば凸性等) が無いため, 得られる解が初期点と終了判定条件に大きく依存するという結果となったため, 多数の初期点から計算を実施し, 得られた結果の中から良いものを選び出すという方法をとった. その結果, 茨城県の中核都市とその勢力圏が抽出できたのみならず, 通勤通学流動がどのように交通網と地勢の影響を受けているかが視覚化できた.

(2) データにふさわしい距離の定義とその計算方法

$m \times m$ ピクセルの画像データ間の EMD の計算は m の 2 乗個のノードを片側に, さらに m の 2 乗個のノードをもう一方の側に持つ 2 部グラフの上の最小費用ネットワーク流問題に定式化される. 両側のすべてのノードの対 (i, j) に対して変数 $f_{i,j}$ が必要であるため, 変数の個数は m の 4 乗となる. これは 30×30 ピクセルのきわめて小さな画像データの場合にも変数が 81 万になることを意味する. ピクセル間の距離が L_1 距離である場

合にはこの変数の個数を m の 2 乗のオーダーまで下げることができることが Lin-Okada [4] によって示されていたが, 本研究では, 距離が L_∞ の場合にも同様の縮小が可能であること, さらに L_2 の場合には EMD の良い近似を与える縮小問題が作れることを示した. これによって 81 万変数を 3600 程度まで減らすことができた. この方法を手書き文字の画像データ間の EMD の計算に適用した結果, 従来の方法では 8 秒ほどかかっていた計算が 0.8 秒まで短縮された.

(3) グラフ構造からの重要度の算定

ゲーム理論的なアプローチによりグラフ構造のノードの重要度を表す指標を提案した. その方法は以下のとおりである. まず, グラフのノード全体をゲームのプレイヤー集合とし, ノード間の接続関係を用いてプレイヤーの作る提携の値を定義する. この定義の仕方は一通りでなく, それによって最終的に得られる指標が異なるので, 提携の値を複数考慮した. 次に, このように定義されたゲームのシャープレー値の明示的な値を求める. 最後に, このようにして得られた指標が満たしている条件を列挙し, それによって指標が一意に決まるかどうかを議論する. 最後の手順は指標の公理化の試みである. 従来[6]によって提案されていた指標に加えて, 本研究では 2 種類の新たな指標を提案し, 実データを用いて, ANP, 従来のゲーム理論的指標と比較検討を行った.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ①. S. Ryo and Y. Yamamoto, "Ranking by relational power based on digraphs," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **52**, (2009), (to appear) 査読有り
- ②. K. Sato and Y. Yamamoto, "A study on linear inequality representation of social welfare functions," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **52**, (2009), (to appear) 査読有り
- ③. 大澤義明, 林利充「隣接グラフと地理値最大化」*日本建築学会計画系論文誌* **73**, (2008), 2417-2424 査読有り
- ④. M. Hachimori and S. Moriyama, "A note on shellability and acyclic orientation," *Discrete Mathematics*, **308**, (2008), 2379-2381 査読有り
- ⑤. D. Talman and Y. Yamamoto, "Average tree solution and subcore for acyclic graph

- games,” *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **51**, (2008), 203-212 査読有り
- ⑥. Y.-C. Jiao, C. Dang and Y. Yamamoto, “An extension of the decomposition method for solving nonlinear equations and its convergence,” *Computers and Mathematics with Applications*, **55**, (2008), 760-775 査読有り
- ⑦. T. Kuno and H. Nagai, “A simplicial branch-and-bound algorithm conscious of special structures in concave minimization problems” *Computational Optimization and Applications*, **39**, (2008), 219-238 査読有り
- ⑧. R. Horst, N.v. Thoai, Y. Yamamoto and D. Zenke, “On optimization over the efficient set in linear multicriteria programming,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, **134**, (2007), 433-443 査読有り
- ⑨. Y. Yamamoto and D. Zenke, “Outer approximation method for the minimum maximal flow problem,” *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **50**, (2007), 14-30 査読有り
- ⑩. K. Ando, M. Tsurutani, M. Umezawa and Y. Yamamoto, “Impossibility and possibility theorems for social choice functions on incomplete preference profiles,” *Pacific Journal of Optimization*, **3**, (2007), 11-25 査読有り

[学会発表] (計 2 件)

- ①. 高野祐一, 山本芳嗣 「距離を保存する Earth Mover’s Distance の定式化」日本オペレーションズ・リサーチ学会 2009 年春季研究発表会, 2009 年 3 月 17 日, 筑波大学
- ②. A. Yoshise, “Homogeneous algorithms for conic complementarity problems,” SIAM Conference on Optimization, May 12, 2008, The Boston Park Plaza Hotel & Towers, Boston, MA, USA

[その他]

ホームページ

山本芳嗣
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000565/profile.html>

大澤義明
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000578/profile.html>

吉瀬章子
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000550/profile.html>

久野誉人
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000635/profile.html>

繁野麻衣子
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000586/profile.html>

八森正泰
<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0000554/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 芳嗣 (YAMAMOTO YOSHITSUGU)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号 : 00119033

(2) 研究分担者

大澤 義明 (OHSAWA YOSHIKI)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号 : 50183760

吉瀬 章子 (YOSHISE AKIKO)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号 : 50234472

久野 誉人 (KUNO HAYATO)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号 : 00205113

繁野 麻衣子 (SHIGENO MAIKO)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
 研究者番号 : 40272687

八森 正泰 (HACHIMORI MASAHIRO)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
 研究者番号 : 00344862