

# 利用方向玫瑰图分析社会经济重心轨迹移动模式

余冰<sup>1</sup> 朱欣焰<sup>1,2,3</sup> 刘汝倩<sup>1</sup> 岚维<sup>1,3</sup>

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学空天信息安全与可信计算教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

**摘要:**社会经济重心的移动轨迹可以直观反映出研究区域整体的宏观地理结构和演变特征,而重心轨迹的相互关系可以体现出不同社会经济属性的地理关联关系。将轨迹分析与地理重心模型相结合,通过方向玫瑰图对由社会经济数据形成的轨迹移动模式进行可视化分析。其中,利用轨迹方向玫瑰图分析单条及全局重心移动轨迹的移动模式,并通过轨迹蜿蜒度提取显著的移动模式;利用轨迹对方向半玫瑰图定量描述两条重心轨迹之间的相对关系。对1985~2004年间我国大陆地区40项经济指标的重心轨迹进行移动模式分析,实验证明了方法的可靠性和有效性。

**关键词:**方向玫瑰图;社会经济重心;轨迹移动模式;空间数据挖掘;可视化分析

中图法分类号:P208

文献标志码:A

社会经济重心是地理重心模型的一种典型应用。在地理重心模型中,考虑不同的空间属性可以得到不同的重心位置,从而应用于不同的领域<sup>[1-3]</sup>。区域经济重心的决定因素有两个,即区域内各单元的地理位置及其经济发展总量。由于地理位置保持不变,因此经济的发展决定了重心的迁移<sup>[4]</sup>。社会经济重心的移动可以反映出社会经济发展的相关问题。近年来,对社会经济重心的研究十分常见,例如对我国近年来的人口、经济重心的分析等<sup>[5-9]</sup>。当前研究侧重单个经济指标重心轨迹的理论分析,较少针对多指标的轨迹进行研究。

随着GNSS技术的发展,移动物体的轨迹数据的获取记录已十分普遍。如何从大量的轨迹数据中提取出有用的信息成为目前研究的热点。不同学科领域使用的轨迹数据也有所不同,包括个人轨迹数据<sup>[10]</sup>、车辆轨迹数据<sup>[11, 12]</sup>等;此外,轨迹数据挖掘还可以运用于数据挖掘和趋势分析中,例如根据经济重心的迁移轨迹发现其中潜在的模式及相互关系。近年来,轨迹数据模式挖掘的发展相当迅速,典型的有REMO方法<sup>[13]</sup>、结合语义的方法<sup>[14]</sup>等。

文献[15]提出了一套完整的利用玫瑰图对轨迹进行移动模式分析的方法。玫瑰图是一种环形直方图,可以表达与角度相关的描述性统计量。文献[15]主要针对两个点的单线段轨迹,未考虑同一对象在多个时间段内的移动变化,也未考虑轨迹的特征和轨迹对的比较分析。本文将玫瑰图的概念应用于社会经济重心轨迹的模式研究中,通过轨迹方向玫瑰图和轨迹对方向半玫瑰图实现对单轨迹、全局轨迹以及轨迹对移动模式的分析。

## 1 研究基础

### 1.1 地理重心模型

地理重心模型本质是将一组空间对象S的几何重心坐标和其对应的某项社会经济指标数据进行加权平均而得到的一个重心坐标。空间对象S代表了基础的空间单元。而社会经济指标数据则表示为S对应的一个指标数据形成的向量M。因此,地理重心模型的输入为一组空间对象S的几何重心(X, Y)以及某社会经济指标向量M,输出为一个重心坐标( $\bar{x}, \bar{y}$ )。其数学表达式为:

$$\begin{cases} \bar{x} = \sum_{i=1}^n M_i x_i / \sum_{i=1}^n M_i \\ \bar{y} = \sum_{i=1}^n M_i y_i / \sum_{i=1}^n M_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $n$  为区域内空间对象的数目;  $(x_i, y_i)$  和  $M_i$  分别为空间对象  $i$  的几何重心位置和属性值, 其中属性值  $M_i$  代表国内生产总值、企业数等社会经济属性值, 从而得到与不同经济属性对应的社会经济重心;  $M_i$  也可以是发病率、犯罪率等其他属性值。

## 1.2 重心轨迹

本文的基础研究单元为同一组空间对象  $S$  的某项社会经济指标  $M$  在顺序多个时间点  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  上的重心坐标所形成的重心轨迹  $P$ 。因此, 对应一个社会经济指标,  $P$  由  $n$  个重心坐标组成。  $P$  可以直观并定量地反映出指标  $M$  对应的地理重心随时间迁移的方向和程度, 可表达为:

$$P: \{(\bar{x}_1, \bar{y}_1, t_1), (\bar{x}_2, \bar{y}_2, t_2), \dots, (\bar{x}_n, \bar{y}_n, t_n)\} \quad (2)$$

式中,  $(\bar{x}, \bar{y})$  表示  $t_i$  时刻空间对象的地理重心;  $n$  表示轨迹上所有点数<sup>[13]</sup>。此外, 还可以以空间对象每次移动的角度和距离来表达其轨迹  $P$ , 可表示为:

$$\{(a_1, d_1), (a_2, d_2), (a_3, d_3), \dots, (a_{n-1}, d_{n-1})\} \quad (3)$$

式中,  $(a_i, d_i)$  分别为  $t_i \sim t_{i+1}$  时刻物体移动的角度和距离, 可由式(4)计算得到:

$$\begin{cases} a_i = \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \\ d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \end{cases} \quad (4)$$

## 1.3 重心轨迹对

将两条重心移动轨迹  $P_1$  和  $P_2$  表示为:

$$\begin{cases} P_1: \{(a_1^1, d_1^1), (a_2^1, d_2^1), \dots, (a_{n-1}^1, d_{n-1}^1)\} \\ P_2: \{(a_1^2, d_1^2), (a_2^2, d_2^2), \dots, (a_{n-1}^2, d_{n-1}^2)\} \end{cases} \quad (5)$$

则这两条移动轨迹之间的相对关系, 可用两者之间每一段的角度差和距离差来表达:

$$\begin{cases} a_i^{12} = (a_i^2 - a_i^1), a_i^{12} \in [0^\circ, 180^\circ] \\ d_i^{12} = (d_i^2 - d_i^1), d_i^{12} \in [0^\circ, +\infty] \end{cases} \quad (6)$$

在计算时, 需将距离差  $d_i^{12}$  取绝对值。由于当两条轨迹的夹角  $a_i^{12}$  在  $[180^\circ, 360^\circ]$  区间时,  $a_i^{12}$  与  $a_i^{12} - 180^\circ$  表达的两条轨迹之间的相对关系是等价的, 所以我们将角度差  $a_i^{12}$  的值在计算时都换算到  $[0^\circ, 180^\circ]$  之间。此时, 轨迹  $P_1$  与  $P_2$  之间的相对关系可以表达为:

$$\{(a_1^{12}, d_1^{12}), (a_2^{12}, d_2^{12}), (a_3^{12}, d_3^{12}), \dots, (a_{n-1}^{12}, d_{n-1}^{12})\} \quad (7)$$

式(7)即是重心轨迹对的表达式。将重心轨迹对的概念应用于社会经济重心轨迹的分析中, 可描述两条不同的经济重心轨迹之间的关系, 从而反映出其各自所对应的社会经济重心模式。

## 2 研究方法

### 2.1 轨迹方向玫瑰图

轨迹方向玫瑰图是将玫瑰图与轨迹数据相结合, 对社会经济重心轨迹数据移动方向分布进行统计, 实现对单条经济重心轨迹或全局经济重心轨迹在某一个连续的时间段内的移动模式探索。

#### 2.1.1 生成方法

对于一条重心轨迹  $P$ , 先将其以移动角度和距离的形式表达(式(3))。然后将一个极坐标空间按角度值划分为偶数  $m$  个等间隔的区域, 即每个区间的角度跨度为  $(360/m)^\circ$ 。对  $m$  个区间, 依次统计轨迹  $P$  中角度  $a_i$  落在该区间内的距离  $d_i$  之和:

$$\text{sum\_}d_j = \sum_{a_i \in j} d_i, j \in m \quad (8)$$

最后, 将各个区间  $\text{sum\_}d_j$  以玫瑰图的形式可视化表达出来, 即可得到重心轨迹  $P$  的轨迹方向玫瑰图。当我们用轨迹方向玫瑰图来分析单条社会经济轨迹的移动模式时, 可根据图上的角度分布特征发现轨迹所对应的某一个社会经济指标的移动方向模式。此外, 轨迹方向玫瑰图可以实现某一区域内的全局轨迹的整体移动方向分析。此时, 只需将区域内在相同时间段的  $n$  条轨迹依次按角度区间进行统计, 最后将结果叠加即可:

$$\text{sum\_}d_j = \sum_{k \in n} \sum_{a_i \in j} d_i^k, j \in m \quad (9)$$

#### 2.1.2 轨迹蜿蜒度衡量及排序

本文使用了蜿蜒度来定量评价一条轨迹的波动程度。蜿蜒度  $T$  是用轨迹的实际长度  $D$  与其起始点的直线距离  $D'$  的比值作为一个衡量指标<sup>[16]</sup>, 即一条以式(2)形式表示的轨迹  $P$ , 其蜿蜒度可表达为:

$$T = \frac{D}{D'} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} d_i}{\sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2}} \quad (10)$$

由式(10)可知, 移动轨迹的蜿蜒度越大, 说明轨迹在移动过程中波动得越厉害, 反映在轨迹方向玫瑰图上, 角度分布越分散; 反之, 则说明轨迹移动得越稳定, 移动模式越显著, 轨迹方向玫瑰图上的角度分布也越集中。

## 2.2 轨迹对方向半玫瑰图

轨迹对方向半玫瑰图是专门针对重心轨迹对的分析方法。其通过重心轨迹对之间的相对关系发现两条重心轨迹之间存在的联动关系和移动模式。由于重心轨迹对之间的角度值是在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 之间的,因此本文将其称为轨迹对方向半玫瑰图。

轨迹对方向半玫瑰图的生成方法与轨迹方向玫瑰图类似。先将两条重心轨迹表达成中心轨迹对的形式,如式(6)所示。对极坐标空间 $[0^\circ, 180^\circ]$ 区域,将其等间隔划分为角度跨度为 $(360/m')$ °的偶数 $m'$ 个区间。统计轨迹对角度差 $a_i^{12}$ 在各个区间的距离差倒数 $1/d_i^{12}$ 之和,并将其表达到半玫瑰图中:

$$\text{sum\_}d_j^{12} = \sum_{a_i \in j} (1/d_i^{12}), j \in m \quad (11)$$

值得注意的是,这里统计的是距离差的倒数而不是距离差,因此,半玫瑰图上表达的 $\text{sum\_}d_j^{12}$ 越大,距离差越小,两条轨迹相似性越高。上述方法是将角度和距离同时考虑的情况。此外,也可以只考虑角度上的差距,不考虑距离上的差值。此时,在各个区间内统计的就不是距离差之和,而单纯的是角度差值出现的次数 $n_j$ ,并将其表达到半玫瑰图中。无论是否考虑距离差的影响,当半玫瑰图上角度集中分布的值越小时,轨迹之间的相似性均越高。

## 3 案例分析

### 3.1 数据来源

本文以统计经济年鉴 1985~2004 年间我国大陆地区的国内生产总值(GDP)、就业人口等 40 项经济指标的重心轨迹数据为例,实现基于方向玫瑰图的社会经济重心轨迹的分析方法。以我国大陆地区各省份为空间对象,社会经济数据

中各经济指标每年的统计值为属性值,根据地理重心模型计算得到对应指标在相应年份的地理重心坐标。其中基础空间数据选取为各省份行政边界的几何重心位置。因此,将某一项经济指标从 1985~2004 年间每年的经济重心位置根据时间顺序以式(6)的形式表达,便可得到该经济指标这 20 a 间的重心轨迹数据。

### 3.2 结果分析

本文中实现的所有探索性分析工具都是通过 Python 编程语言完成的,整个分析过程都与可视化分析紧密结合。在该实例中,本文将轨迹方向玫瑰图划分成了 32 个区间,轨迹方向半玫瑰图则划分了 16 个区间来进行分析。

#### 3.2.1 轨迹方向玫瑰图

图 1 将所有 40 项经济指标重心轨迹按蜿蜒度排序,得到模式最显著的三条轨迹的轨迹方向玫瑰图。从图 1 中可以直观看出,年底户籍总人口数所对应的重心轨迹移动最为显著,呈现明显的往西南地区移动的趋势。与此同时,常驻人口(男)和从业人员也表现出相似的移动模式。因此,可以得出结论,在 1985~2004 年间,我国人口重心是偏西、偏南移动的。

此外,将轨迹方向玫瑰图应用于对全局轨迹的分析,结果如图 2 所示。其分为三个时间段,从图 2 中可以看出,1985~2004 年期间的前 10 a,重心轨迹整体偏南、偏西移动,而后 10 a 则相反,即偏北、偏东移动。

#### 3.2.2 轨迹对方向半玫瑰图

提取出 40 项经济指标重心轨迹,实例数据中视觉上相似度较高的 4 组轨迹对如图 3 所示。在轨迹对方向半玫瑰图中,角度值从小到大分别代表了轨迹对之间的相似性从高到低。可以看出,经济重心轨迹是第一产业总产值与农林牧渔业总产值相似性最高。

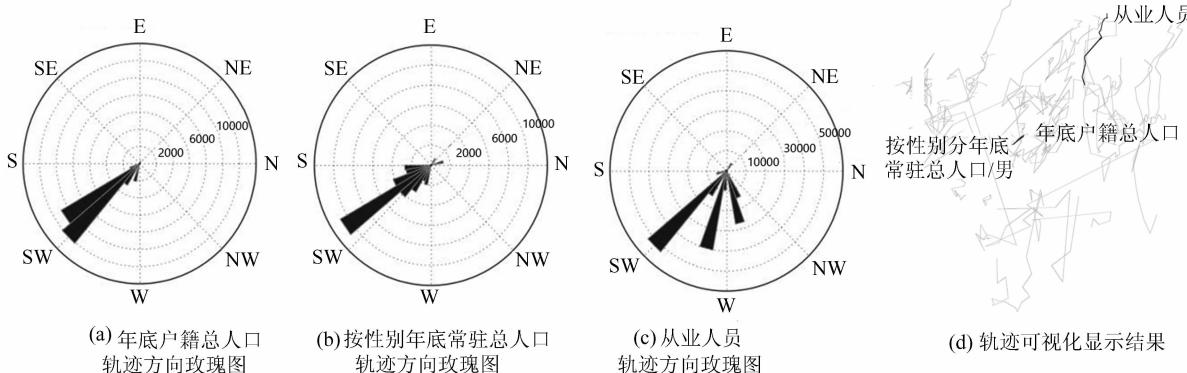


图 1 根据蜿蜒度排序结果

Fig. 1 Sorted by Tortuosity

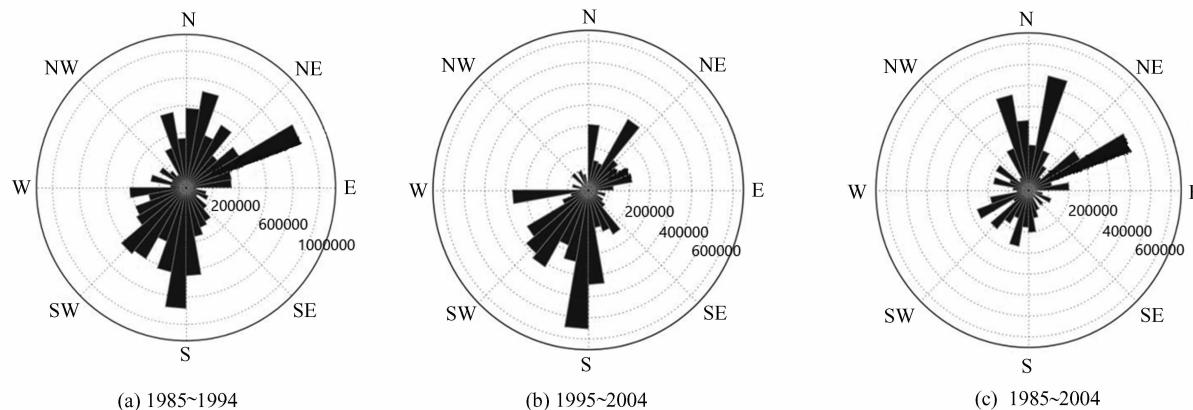


图2 全局轨迹方向玫瑰图

Fig. 2 Global Trajectories Directional Rose-diagram

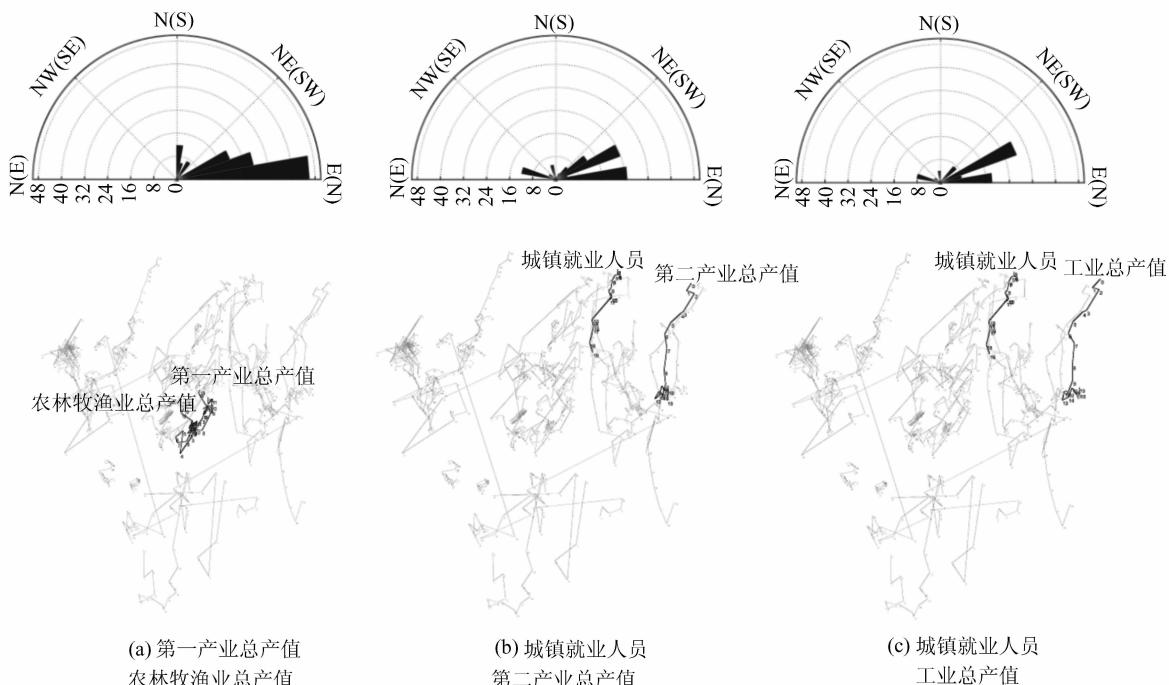


图3 轨迹对方向半玫瑰图提取结果

Fig. 3 Extraction Results of Directional Semi-rose-diagram

## 4 结语

社会经济重心的迁移变化反映了区域内部经济结构的变化。因此,研究社会经济重心移动轨迹移动模式,可以帮助我们理解社会经济发展的趋势,发现影响经济发展的因素以及各项经济指标之间的影响关系等。本文将玫瑰图的方法用于重心轨迹分析中,实现社会经济重心轨迹中隐含的移动模式的探索。其中,轨迹方向玫瑰图既可以分析单条轨迹的移动模式,也可以从全局特性考虑,分析全局轨迹的整体移动方向。轨迹对方向半玫瑰图,可以表达两条重心轨迹之间的相对

关系。上述方法可以帮助我们探索隐藏在社会经济时空数据中的模式与关联,无需过多的先验知识和假设。本文中,蜿蜒度指标是与所选取指标数据在时间上的尺度相关的,未来将探讨其在多个时间尺度下的敏感性,并针对轨迹中蕴含的语义信息和轨迹形成的聚类群组进行进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] Zorn H, Schafer A, Manow P. European Social Policy and Europe's Party-political Center of Gravity, 1957-2003 [OL]. <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:1234220/component/escidoc:1234218/dp04-6.pdf>, 2004
- [2] Li Guangqiang, Zeng Shaoqin, Deng Min, et al. Em-

- ploying a Centroid Transferring Curve to Spatio-temporal Evolution Patterns [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 940-944(李光强,曾绍琴,邓敏,等. 重心转移曲线在时空演化模式表达中的应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2013,38(8):940-944)
- [3] He Guosong, Zhu Guorui. Change of the Cultivated Land and Driving Forces in Poor Mound Region Based on Spatio-temporal Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(6): 508-512(何国松,祝国瑞. 基于时空分析的贫困丘陵山区耕地变化机理研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2004,29(6): 508-512)
- [4] Zhou Minliang. The Economic Center, Regional Disparities and Coordinated Development [J]. *Social Sciences in China*, 2000, 2:42-53, 206(周民良. 经济重心、区域差距与协调发展 [J]. 中国社会科学, 2000,2:42-53,206)
- [5] Qiao Jiajun, Li Xiaojian. The Shift Route of Chinese Economic Gravity Center in Recent 50 Years [J]. *Areal Research and Development*, 2005, 1:12-16(乔家君,李小建. 近 50 年来中国经济重心移动路径分析 [J]. 地域研究与开发,2005,1:12-16)
- [6] Hu Anjun, Liu Yuanchun. The Gravity Shift of Regional Economies and Trends of Equalization in China [J]. *Economic Theory and Business Management*, 2013, 12:101-109(胡安俊,刘元春. 中国区域经济重心漂移与均衡化走势 [J]. 经济理论与经济管理,2013,12:101-109)
- [7] Xu Shan, Tang Nan, Wei Dong, et al. The Evolution of Population Gravity Center and Economy Gravity Center in Xi'an Based on GIS [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 6:987-991(徐姗,唐楠,魏东,等. 基于 GIS 的西安市人口与经济重心空间演变研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版),2013, 6: 987-991)
- [8] Ye Mingque. Characteristics and Influence Factors Analysis of Gravity Movement for China's Economy from 1978 to 2008 [J]. *Economic Geography*, 2012, 4: 12-18(叶明确. 1978—2008 年中国经济重心迁移的特征与影响因素 [J]. 经济地理,2012,4:12-18)
- [9] Yin Wei, Hu Xiaobing, Li Yulin. Comparative Study on Growth Gravity Evolution Curves of Chinese Economy and High-Tech Industry [J]. *Economic Geography*, 2012, 1:90-95(尹为,胡啸兵,李育林. 中国高技术产业重心与经济重心变动轨迹比较 [J]. 经济地理,2012,1:90-95)
- [10] Song Chaomin, Qu Zehui, Blumm N, et al. Limits of Predictability in Human Mobility [J]. *Science*, 2010, 327(5 968): 1 018-1 021
- [11] Liu Yu, Kang Chaogui, Gao Song, et al. Understanding Intra-urban Trip Patterns from Taxi Trajectory Data [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2012, 14(4): 463-483
- [12] Liu Jingnan, Fang Yuan, Guo Chi, et al. Research Progress in Location Big Data Analysis and Processing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 379-385(刘经南,方媛,郭迟,等. 位置大数据的分析处理研究进展 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014,39(4): 379-385)
- [13] Zheng Yu, Zhou Xiaofang. Computing with Spatial Trajectories [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011
- [14] Baglioni M, de Macêdo J A F, Renso C, et al. Towards Semantic Interpretation of Movement Behavior [OL]. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-00318-9\\_14](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-00318-9_14), 2009
- [15] Murray A T, Liu Yu, Rey S J, et al. Exploring Movement Object Patterns [J]. *The Annals of Regional Science*, 2012, 49(2): 471-484
- [16] Rey S J, Ye X. Comparative Spatial Dynamics of Regional Systems [OL]. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03326-1\\_20](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03326-1_20), 2010

## A Rose-diagram Based Approach for Analyzing Movement Patterns of Socioeconomic Gravity Center Trajectories

SHE Bing<sup>1</sup> ZHU Xinyan<sup>1,2,3</sup> LIU Ruqian<sup>1</sup> GUO Wei<sup>1,3</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Aerospace Information Security and Trusted Computing Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

**Abstract:** The movement trajectories of socioeconomic gravity centers can reflect the characteristics of

(下转第 1092 页)

compared. Results showed that, as compared to the LSC method, the proposed method reduced the systematic error of data fusion. It showed better behaviors both in fusion precision and reliability than standard LSC.

**Key words:** least square collocation; variance component estimating; Tikhonov normalizing; multi-source gravity data; data fusion

**First author:** SUN Wen, PhD, specializes in physical geodesy. E-mail: geodesysw@hotmail.com.

**Foundation support:** The National High Technology Research and Development Program, No. 2013AA122502; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274029, 41304022, 41404020; the Open Research Fund Program of Key Laboratory of Earth Spatial Environment and Geodesy, Ministry of Education, No. 11-01-03.

(上接第 1059 页)

micro and macro geographical structure evolution, while the correlation of gravity center trajectories indicates geographic relationships between different socioeconomic attributes. In this paper, we combine the analysis methods for entity object trajectories with geographic Center-of-Gravity models. We analyze movement patterns of trajectories generated from socioeconomic data as represented through directional rose-diagrams. A directional rose-diagram for trajectories allows analyzing movement patterns of socioeconomic gravity center trajectories from both individual and global scales. We also can extract the gravity center trajectories displaying significant patterns by tortuosity analysis. Besides, the half directional rose-diagram, an analysis tool especially for trajectory pairs, can intuitively express the relative relationship between two center trajectories. We take the trajectories of the center of gravity for 40 economic indicators in mainland China from 1985 to 2004 and mine their movement patterns as an example. This experiment provides a set of effective exploratory spatial-temporal data analysis tools for the study of socioeconomic data.

**Key words:** directional rose diagram; socioeconomic gravity center; movement pattern of trajectories; spatial data mining; visual analysis

**First author:** SHE Bing, PhD, specializes in the spatio-temporal data analysis and natural language location understanding. E-mail: coolnanjizhou@163.com

**Corresponding author:** GUO Wei, PhD, associate professor. E-mail: guowei98032@gmail.com

**Foundation support:** The National Nature Science Foundation of China, No. 41271401; National Science & Technology Support Plan, No. 2012BAH35B03.