



# 利用 Snake 移位模型构建中心型地图

魏智威<sup>1,2</sup> 刘远刚<sup>3</sup> 许文嘉<sup>4</sup> 王 洋<sup>1,2</sup>

1 中国科学院网络信息体系技术重点实验室, 北京, 100830

2 中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 100830

3 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉, 430100

4 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京, 100876

**摘 要:**中心型地图可表示空间各点到中心点的时间距离,能直观反映地理分布因交通系统影响而产生的相近性变化。其构建核心是依据控制点的位置移动确定非控制点的新位置,因此,将中心型地图的构建过程建模为地图目标的移位问题,以相对邻近图表示点之间的邻近关系,并基于控制点的位置移动计算点的初始受力,应用 Snake 移位方法迭代计算各点的新位置生成中心型地图,同时利用后处理解决潜在拓扑错误。利用所提方法和最小二乘方法可视化武汉市到其他各市的旅行时间,并定量、定性地进行对比分析。结果表明,所提方法能更好地避免拓扑错误,且局部形态保持更好。

**关键词:**中心型地图;时空可视化;时间地图;空间变形;移位算法

**中图分类号:**P208;P28

**文献标志码:**A

交通网络可达性是决定空间相互作用强度和广度的重要因素,时间距离作为衡量交通可达性的核心指标,其可视化能有效辅助分析交通系统对区域空间格局和经济现象时空布局的影响<sup>[1]</sup>。中心型地图将各点到中心点的时间距离转化为对应点之间的空间距离,表达形象直观,是一种广泛采用的时间距离可视化形式<sup>[2]</sup>。

依据地理空间是否变形,中心型地图可划分为不规则式(irregular isochrones, IIMap)和同心圆式(concentric isochrones, CIMap)。其中, CIMap 对空间进行变形能更直观反映各点因交通系统影响而产生的相近性变化,是中心型地图研究的重点<sup>[3-4]</sup>。CIMap 中各点依据其到中心点的时间距离是否已知,可划分为控制点和非控制点。CIMap 为了使控制点到中心点的时间距离与对应点间空间距离一致,需将控制点移动至新位置。同时,为保持各点之间空间关系,需依据控制点的位置移动将非控制点移动到新位置,并且依据方向不变性和距离恒定性原则能快速计算控制点的新位置<sup>[3]</sup>,因此, CIMap 生成的关键是基于控制点的位置移动计算区域内非控制点的新位置,如文献[5]利用薄板样条函数基于控制

点的位置移动进行内插计算其他点的新位置;文献[6]利用最小二乘函数基于控制点的位置移动表达整个地理区域的变形,并基于该函数计算其他点的新位置;文献[7]对原始点集进行三角网剖分,并依据控制点关联三角形的重心在变形后的位置移动计算对应三角形内其他点的新位置。但是,上述方法均试图通过一次计算就获取区域内其他点的新位置,有时难以获得满意结果,可能存在边界自相交等拓扑错误。因此,文献[3,8]在最小二乘方法中增加了拓扑一致性的后处理操作;文献[6]在三角网剖分方法中添加了动态约束条件。但是,若点数量较多或地理区域变形程度较大时,后处理有时难以有效解决所有拓扑错误,有必要将较大的控制点位置移动分解为多次微小的移动,以求解区域内其他点的新位置,并在逐步移位过程中解决潜在拓扑错误。移位是地图综合的基础操作,已发展有较多成熟的渐进式地图要素移位方法。CIMap 依据控制点的位置移动确定地理边界上非控制点的位置移动,可建模为表达地理边界的线要素移位问题。因此,若应用适宜于线状要素移位的 Snake 模型渐进式地移动 CIMap 中各点,就能有效生成无拓扑

错误的 CIMap<sup>[9-13]</sup>。

基于上述分析,本文将 CIMap 的生成过程建模为地图要素的移位问题,设计适宜 CIMap 生成的 Snake 移位方法。首先,利用相对邻近图(relative neighborhood graph, RNG)将 CIMap 中各点关联为线状网络约束各点间空间关系,并将控制点较大的位置移动分解为多次微小的位置移动;然后,迭代应用 Snake 算法生成最终的 CIMap,同时在逐步移位的过程中进行后处理操作,以解决可能的拓扑错误。

## 1 Snake 移位方法

Snake 移位方法多用于线状要素,其原理是将曲线因受外力而产生的变形描述为能量,通过求解能量最小化问题计算曲线移位后的最优形状和位置<sup>[10]</sup>。利用 Snake 移位方法生成 CIMap,首先将 CIMap 生成过程中涉及的点关联为线状网络;然后计算线状网络受力;最后基于构建的线状网络及其受力,利用 Snake 方法求解能量最小化问题可获取线状网络中各点的新位置,即 CIMap 中各点的新位置。CIMap 生成过程中涉及的各点依据其属性可划分为3类:(1)中心点,记为  $O$ ,表示时间距离计算中心。(2)控制点,记为  $P = \{p_1, p_2 \cdots p_m\}$ ,  $p_i \in P$ ,其中,  $p_i$  到  $O$  的时间距离已知。CIMap 需将  $p_i$  到  $O$  的时间距离转化为  $p_i$  到

$O$  的空间距离。依据方向不变性和距离恒定性原则<sup>[3]</sup>,可计算得到  $p_i$  在 CIMap 中的新位置  $p'_i$ ,即对于任意的  $p_i \in P$ ,  $p_i$  在生成的 CIMap 中需移动至新位置  $p'_i$ ,记为  $P' = \{p'_1, p'_2 \cdots p'_m\}$ ,  $p'_i \in P$ 。(3)非控制点,记为  $Q = \{q_1, q_2 \cdots q_n\}$ ,  $q_j \in Q$ ,表示中心点和控制点关联的区域范围内的地形数据,通常为政区边界。其中,为有效保持各点之间的空间关系,  $Q$  中的各点需伴随  $P$  中点的位置移动而移动至新位置。考虑到点集  $Q$  通常表示一定的地理边界,  $Q$  中的各点移动时需要维护边界相关的拓扑关系。

### 1.1 线状网络构建

邻近图以图的形式表达地图目标间邻近关系和空间分布,能有效反映地图目标之间相互联系、相互依存和相互影响的能力<sup>[14]</sup>。其中, RNG 能用更少边较完整地反映地图目标间的邻近关系和空间分布<sup>[15-16]</sup>。因此,本文采用 RNG 将控制点集  $P$  和非控制点集  $Q$  关联为线状网络,如图 1 所示。考虑到点集  $Q$  通常表示地理区域边界,构建 RNG 时需将点集  $Q$  表示的地理边界作为约束条件,本文线状网络构建流程如下:(1)以点集  $Q$  表示的地理边界为约束条件,基于点集  $P$  和  $Q$  构建约束性三角网(constrained Delaunay triangulation, CDT),结果见图 1(b);(2)基于 CDT 生成 RNG,结果见图 1(c)。

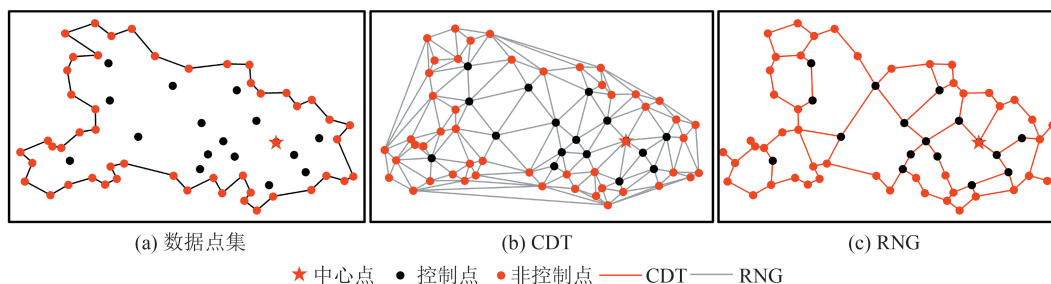


图1 线状网络构建

Fig.1 Construction of Proximity Graph

### 1.2 受力计算

利用 Snake 方法生成 CIMap 的关键是基于控制点集  $P$  的位置移动计算非控制点集  $Q$  的新位置。其中,控制点的位置移动会对构建的线状网络产生力。依据§1.1 分析,给定控制点  $p_i$ ,依据方向不变性和距离恒定性原则,可计算  $p_i$  在 CIMap 中的新位置  $p'_i$ <sup>[3]</sup>,即点  $p_i$  在力  $f_{pi}$  的作用下可移动至  $p'_i$ ,则控制点  $p_i$  的受力  $f_{pi}$  表示为向量  $V_{p_i, p'_i}$ 。部分控制点的移动距离可能较大,而利用 Snake 移位方法仅在移位量较小时才能保证求解结果的稳定性<sup>[17]</sup>,且将较

大的位置移动分解为多次微小的位置移动也有利于在逐步移位过程中保证结果的正确性。因此,参考文献[10-11]对每次移位过程中控制点的最大受力进行限制。假设存在控制点集  $P = \{p_1, p_2 \cdots p_m\}$ ,  $p_i \in P$ ,点  $p_i$  的受力为  $f_{pi}$ ,  $P$  中点的最大受力为  $|f_{\max}|$ 。给定最大受力阈值  $T_f$ ,若  $|f_{\max}| > T_f$ ,则需调整点  $p_i$  的受力为  $f'_{pi}$ ,  $f'_{pi}$  的计算如下:

$$f'_{pi} = f_{pi} \frac{T_f}{|f_{\max}|} \quad (1)$$

## 2 渐进式处理过程

一次移位通常难以获取满足条件的结果,需迭代执行 Snake 方法使得控制点逐步移动至新位置<sup>[10]</sup>,该迭代处理过程需要:(1)针对迭代处理的不同阶段,设置相应的终止条件;(2)针对每次迭代处理后可能出现的拓扑错误,设计后处理操作。

### 2.1 迭代处理过程与终止条件

依据§1.2定义,控制点 $p_i$ 基于式(1)计算获取的受力可使其移动至 $p'_i$ 。但是,Snake 移位方法基于能量最小化原理计算线状网络中各点新位置时需综合考虑线状网络中所有点的受力。因此,应用 Snake 移位方法移动控制点 $p_i$ 使其尽可能接近 $p'_i$ ,而并不会直接移动至 $p'_i$ 。为保证各控制点都能准确移动至新位置,本文将迭代处理过程划分为两个阶段。

#### 1) 阶段一

阶段一迭代执行 Snake 移位方法,使得各控制点尽可能地接近其新位置,其终止条件包括:(1)Snake 移位方法执行次数(Step)达到设定的阈值 $T_s'$ ,若 $\text{Step} \geq T_s'$ ,则阶段一终止;(2)执行 Snake 移位方法后各控制点在移位后无法更接近其新位置,可基于邻近两次移位过程中各点的最大移位量 $\max(d_{t-1})$ 和 $\max(d_t)$ 定义。若 $\max(d_t) > \max(d_{t-1})$ ,一定程度上可认为执行 Snake 移位方法后无法使得各控制点在移位后更接近其新位置,则阶段一终止。

#### 2) 阶段二

阶段一已使得各控制点尽可能地接近其新位置。因此,阶段二需要考虑逐步将已接近其新位置的控制点直接移动到新位置。给定距离阈值 $T_d$ ,控制点 $p_i$ 到其新位置 $p'_i$ 的距离为 $d_{pi}$ ,依据控制点相对其新位置的距离可将控制点分为两类:(1)若 $d_{pi} > T_d$ ,则点 $p_i$ 为一类控制点,即离新位置仍较远的控制点;(2)若 $d_{pi} \leq T_d$ ,则点 $p_i$ 为二类控制点,即已接近其新位置的控制点。

对于二类控制点,在阶段二迭代执行 Snake 移位方法时,应在当前一次移位中将其移动至新位置;同时,二类控制点在下一次移位中将不再作为控制点参与移位,即后续迭代过程中其不再移位。为保证二类控制点 $p_i$ 在当次移动中可移动至其新位置 $p'_i$ ,在 Snake 移位方法中点 $p_i$ 的移位向量直接设置为 $V_{p_i, p'_i}$ 。阶段二的终止条件包括:(1)Snake 移位方法执行次数(Step)达到设定的

阈值 $T_s$ ,若 $\text{Step} \geq T_s$ ,则阶段二终止,且当 $\text{Step} = T_s$ 时,当前参与移位的所有控制点均需在当次移位中移动至新位置。(2)已不存在一类控制点。

### 2.2 后处理操作

非控制点集 $Q$ 通常表示一定的地理边界,利用 Snake 移位方法对点集移位后位于边界内的控制点可能会被移动至边界外,即产生拓扑错误。因此,每次应用 Snake 移位方法移位后需要对可能的拓扑错误进行处理。其中,Snake 移位方法以邻近图为骨架约束控制点和非控制点间拓扑关系,且限制了点的最大受力,故利用 Snake 移位方法移位后仅会产生少量拓扑错误,可针对存在拓扑错误的局部区域分别处理,即处理边界外的控制点。如图 2(a)所示,若存在控制点 $p_i$ 位于边界外,需将边界的局部扩展至点 $p_i$ ;同时,向边界内部方向移动点 $p_i$ 。假设控制点 $p_i$ 到边界的最邻近点为 $n_i$ ,边界外点 $p_i$ 的处理方法如下:在点 $p_i$ 处添加边界点 $q_j$ ,即将边界局部扩展至点 $p_i$ 处;同时,将 $p_i$ 移动至点 $n_i$ ,即向边界内部方向移动点 $p_i$ 。其中,在 $p_i$ 邻近区域内添加边界点 $q_j$ ,一定程度可减少后续移位过程中 $p_i$ 移动至边界外的可能。

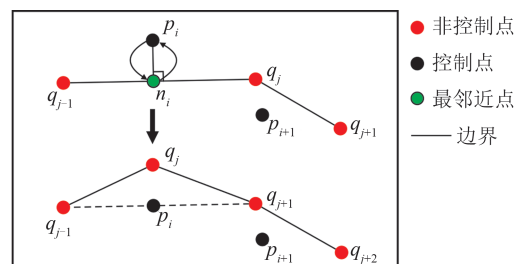


图 2 边界外点处理

Fig.2 Processing of the Points Outside Boundaries

## 3 实验与结果分析

### 3.1 实验设置

近年来,中国铁路的快速发展大幅缩短了中心城市相对于其他城市的时间距离,本文以武汉市为例,利用 CIMap 可视化武汉市到湖北省及其邻近各省 86 个地级市的最短铁路旅行时间。利用 Python 编码爬取 12306 网站 2022-06-17 武汉市铁路直达和中转到达 86 个地级市的所有车次耗时,取最短耗时为武汉市到各地的铁路旅行时间,结果见表 1。

实验基于 AE10.2 利用 C# 二次开发实现本文方法,实验平台为 Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @1.60 GHz,内存为 8 GB,操作系统为 Windows 10(64 位)的计算机。参考地图要素的位置

表 1 武汉市至各地级市最短铁路旅行耗时

Tab.1 The Shortest Railway Travel Time from Wuhan to Other Cities

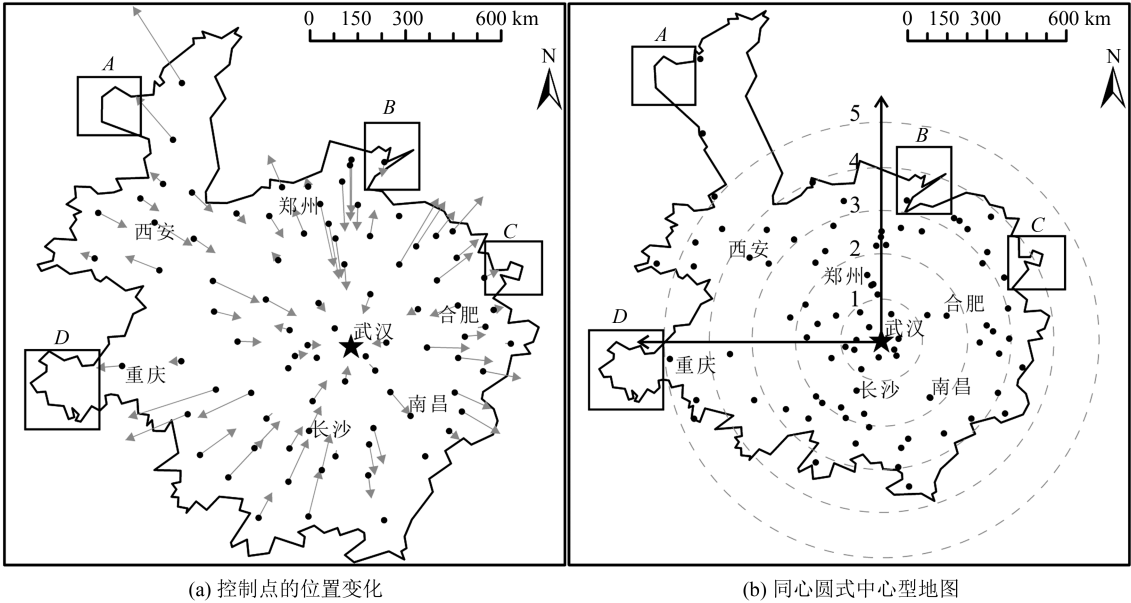
目的地	耗时/min	目的地	耗时/min	目的地	耗时/min	目的地	耗时/min
合肥	97	神农架林区	131	恩施土家族苗族自治州	212	湘西土家族苗族自治州	283
芜湖	148	济源	673	开封	133	重庆	296
蚌埠	192	黄石	30	洛阳	147	西安	217
淮南	177	十堰	117	平顶山	173	铜川	507
马鞍山	182	宜昌	104	安阳	152	宝鸡	293
淮北	296	襄阳	72	鹤壁	144	咸阳	271
铜陵	176	鄂州	22	新乡	132	渭南	222
安庆	137	荆门	202	焦作	201	延安	481
黄山	238	孝感	25	濮阳	198	商丘	162
滁州	192	荆州	74	许昌	78	信阳	39
阜阳	198	黄冈	24	漯河	79	周口	159
宿州	230	咸宁	24	三门峡	186	郴州	148
六安	73	随州	49	南阳	142	永州	193
亳州	199	郑州	93	萍乡	122	怀化	164
池州	165	仙桃	40	九江	105	娄底	120
宣城	178	潜江	51	长沙	78	驻马店	64
南昌	104	天门	35	株洲	105	景德镇	178

精度约束,设置  $T_f=0.5\text{ cm}$ ,  $T_d=0.1^{[18]}$ ;参考文献[11],Snake方法迭代次数与控制点数量( $N_{cc}$ )相关,取  $T'_s=\lfloor 0.5N_{cc}\rfloor$ ,  $T_s=N_{cc}$ ;同时,为避免  $T'_s$  和  $T_s$  取值过大或过小,若  $N_{cc}\leq 40$ ,则  $N_{cc}=40$ ;若  $N_{cc}\geq 100$ ,则  $N_{cc}=100$ 。

3.2 结果评价

基于表达详细程度的需要和计算效率等的

考量,地理边界需要化简。本文利用ArcGIS 10.2中Simplify Polygon工具下的POINT\_REMOVE方法对地理边界进行化简,化简阈值为 $0.1^\circ$ 。依据各市到武汉市的时间距离,表示各市对应控制点在CIMap中的位置可依据文献[3]中方法计算,结果见图3(a);依据§3.1描述参数执行本文方法,结果见图3(b)。



注:箭头长度表示控制点移动距离;箭头方向表示控制点移动方向

图 3 武汉市到各地铁路旅行时间可视化表达的 CIMap

Fig.3 CIMap Visualizing the Railway Travel Time from Wuhan to Other Cities

1)定性评价

结合表 1 和图 3 可知,地图数据经过变形后,

武汉市相对于地图中任意一点的距离均表示两点之间的时间距离,其中,湖北省邻近的 5 省省会



城市郑州市、长沙市、南昌市、合肥市和西安市到武汉市的时间距离相对于其到武汉市的空间距离有明显缩小,且郑州市、长沙市、南昌市和合肥市均为武汉市 2 h 可达城市;由于山脉阻隔等原因,重庆市到武汉的时间距离相对于其到武汉市的空间距离略有增长,符合人的实际认知。另外,有通往武汉市的高速铁路沿线(河南省中部、湖南省中部、陕西省中部、江西省北部等地区)城市到武汉市的时间距离相对于其到武汉市的空间距离有明显缩小,而湖南省西部、陕西省北部等地区城市到武汉市的时间距离相对于其到武汉市的空间距离有明显增大,符合 2016 年调整后《中长期铁路网规划》指出的中国“八纵八横”高速铁路网布局。因此,图 3 中地图数据的变形均较好地反映了上述地理分布因交通系统影响而产生的相近性变化。

另外,局部形态的变化较难量化表达,本文针对局部区域(图 3 中区域 A、B、C 和 D)分析地理边界变形后局部形态的变化情况。由图 3 可知,位于局部区域 A~D 的弯曲在形态上都一定程度上得到了保持,如区域 B 的尖角部分和区域 C 的凸出部分的弯曲,可认为本文方法较好地保持了原始地理边界的局部形态。

## 2) 定量评价

利用边界外控制点数量( $N_{oc}$ )和自相交点数量( $N_{ic}$ )评价实验结果的合理性,利用重叠面积比( $A_{sim}$ )和基于转角函数的形状相似性( $T_{sim}$ )评价地图数据变形后地理边界的形态变化<sup>[19-20]</sup>,统计结果见表 2。

表 2 实验结果统计分析

Tab.2 Statistical Results of the Evaluation on the Experimental Results

方法	$N_{oc}$	$N_{ic}$	$A_{sim}$	$T_{sim}$
本文方法	0	0	0.629	0.741
最小二乘方法	6	4	0.579	0.721

由表 2 可知,利用本文方法生成的 CIMap 能很好地避免边界自相交和控制点落于边界外,无拓扑错误,满足可视化要求;同时, $A_{sim}$  为 0.629,  $T_{sim}$  为 0.741,一定程度上可认为本文方法较好地维护了原始地理边界的形态特征。

## 3) 对比分析

最小二乘方法是目前最常采用且被证明为最佳的方法<sup>[2,8]</sup>,因此,基于最小二乘方法生成 CIMap 与本文方法进行对比,验证本文所提方法的

有效性,结果见图 4 和表 2。可以看出,基于最小二乘方法生成的 CIMap 中有 6 个控制点位于边界外,且存在 4 个自相交节点,而本文方法生成的结果无控制点位于边界外,且不存在自相交点,这表明本文方法能更好地避免控制点落于边界外和边界自相交。同时,相比最小二乘方法,本文方法的  $A_{sim}$  和  $T_{sim}$  分别提高 0.050 和 0.020,即本文方法能更好地维护原始地理边界形态特征。另外,对比图 3 和图 4 所示的局部区域(A、B、C 和 D)发现,本文方法较好地保持了区域 A 和 C 局部区域中弯曲的形态,而利用最小二乘方法生成的结果对应区域中弯曲会产生尖角;在区域 B 和 D,最小二乘方法生成的结果中边界会存在自相交,且存在控制点位于边界外,而本文方法不存在上述问题。依据上述分析可知,本文方法相比已有方法能更好地避免拓扑错误,且局部形态保持更好。

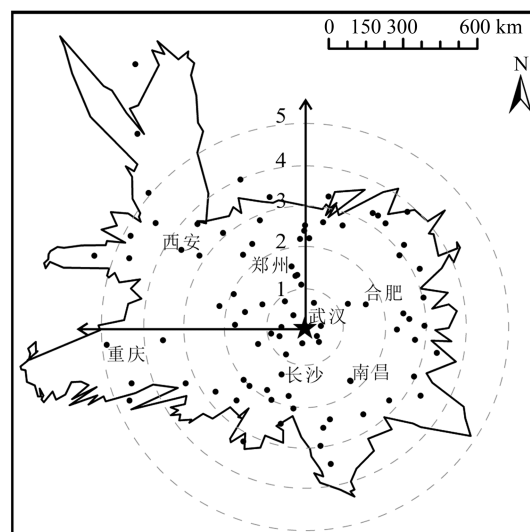


图 4 最小二乘方法生成的同心圆式中心型地图

Fig.4 CIMap Based on the Least-Square Optimization

## 4 讨论

线状网络构建和受力计算是 Snake 移位方法的关键,需分析不同线状网络构建策略和受力计算策略对实验结果的影响。同时,实际应用中控制点数量通常固定,而地理边界由于表达需要可能有不同详细程度,即非控制点数量不同,需分析地理边界化简程度对于实验结果的影响;同时,参与计算的点数量会影响算法效率。

### 4.1 线状网络构建策略对实验结果的影响

本文利用 RNG 将控制点集和非控制点集关联为线状网络,而描述地图目标间邻近关系的邻近图还包括 CDT 和最小生成树(minimum spanning tree, MST)等<sup>[15]</sup>,其中,  $MST \subseteq RNG \subseteq CDT$ 。

因此,本文基于CDT和MST将控制点集和非控制点集关联为线状网络,并利用本文方法生成CIMap,结果见图5;统计Snake移位方法迭代总次数(Step)和运行时间 $t$ 分析算法效率,统计后处理次数分析不同邻近图对于结果影响,结果见表3。其中,基于MST构建线状网络生成CIMap会产生较多拓扑错误,因此,本文基于MST生成CIMap时未进行后处理操作。

由图3、图5和表3可知,利用CDT和RNG构建线状网络均能生成满足条件的结果。但是,由于 $RNG \subseteq CDT$ ,即CDT包含了更多邻近关系,其算法迭代次数会多14次,算法运行时间( $t$ )会多94.86 s,即效率更低;但是,利用CDT所需的后处理次数会少1次。综合考虑算法效率和后

处理的次数,本文利用RNG算法构建线状网络,实际应用中用户可依据需要选用。而利用MST则难以获得满足条件的结果,如图5(b)、5(c)所示,由于MST仅描述了点之间连通的最邻近关系,对点进行移位时易产生较多拓扑错误,且随着算法的迭代结果偏差会变大。

表3 线状网络构建策略对实验结果的影响统计分析  
Tab.3 Statistical Results of the Influence on CIMap Using Different Proximity Graphs

统计结果	RNG	CDT	MST
Step	76	90	—
$t/s$	465.29	560.15	—
后处理次数	3	2	—

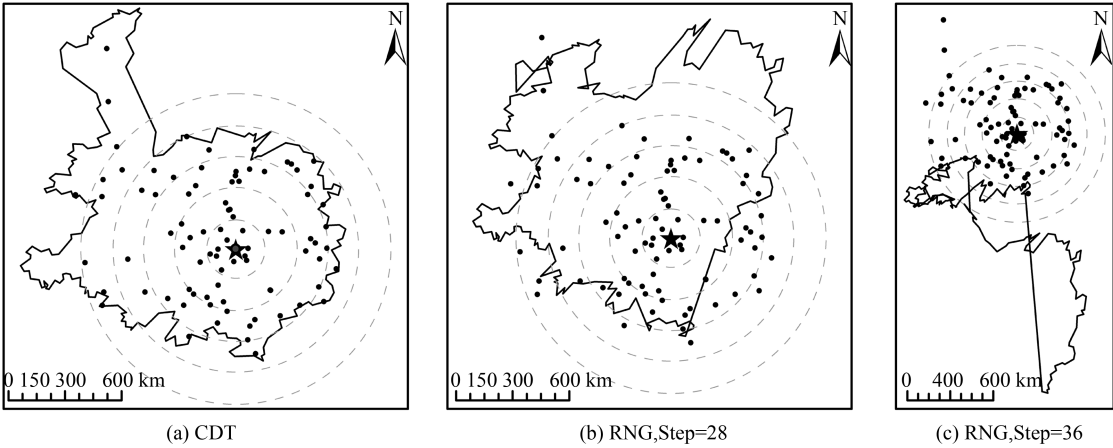


图5 基于不同邻近图生成的CIMap  
Fig.5 CIMaps Based on Different Proximity Graphs

4.2 受力计算对实验结果的影响

本文考虑到部分控制点的移动距离可能较大,因此,计算受力时对每次移位过程中控制点的最大受力进行了限制。若不对控制点受力进行限制,则难以获得满足条件的结果,图6为控制点受力不受限时算法迭代第二次的生成结果,可见这种情况下所得结果的图形和拓扑特征已经基本丢失。这是因为利用Snake移位方法求解仅在移位量较小时才能保证结果的稳定性<sup>[17]</sup>。

4.3 地理边界化简程度对实验结果及效率的影响分析

地理边界由于表达需要可能有不同详细程度,本文利用ArcGIS 10.2的Simplify Polygon工具,以POINT\_REMOVE化简方法分别以阈值 $0.5^{\circ}$ 、 $0.2^{\circ}$ 、 $0.1^{\circ}$ 、 $0.05^{\circ}$ 和 $0.02^{\circ}$ 生成不同详细程度的地理边界,并基于这些地理边界应用本文方法生成CIMap分析化简程度对于实验结果的影响。其中,本实验中控制点数量( $N_{cc}$ )固定为86,地理

边界越详细,即非控制点数量越多,本文用非控制点数量( $N_{qc}$ )、点总数量( $N_{sc}$ )和控制点与非控制点比例(Ratio)表示地理边界化简程度,统计算法迭代次数(Step)和耗时 $t$ ,以分析地理边界化简程度对算法效率的影响,统计后处理次数分析地理边界化简程度对实验结果的影响,结果见表4。

由表4可知,算法迭代次数与非控制点数量 $N_{qc}$ 和点总数量 $N_{sc}$ 无明显关系;而算法耗时 $t$ 会随着点总数量 $N_{sc}$ 的增大而明显增大,当点总数量超过500时,算法耗时超过1 h,这是因为Snake方法涉及较多的矩阵计算,其计算复杂度会随着点数量的增大而呈指数上升,导致算法耗时增加,即地理边界表达越详细,算法效率越低。后处理次数随着非控制点数量 $N_{qc}$ 和Ratio的增加而逐渐减小。但是,当Ratio超过0.45后,后处理次数并不会明显减少,这是因为本文设置了最大算法迭代次数。当Ratio小于0.2时,算法会

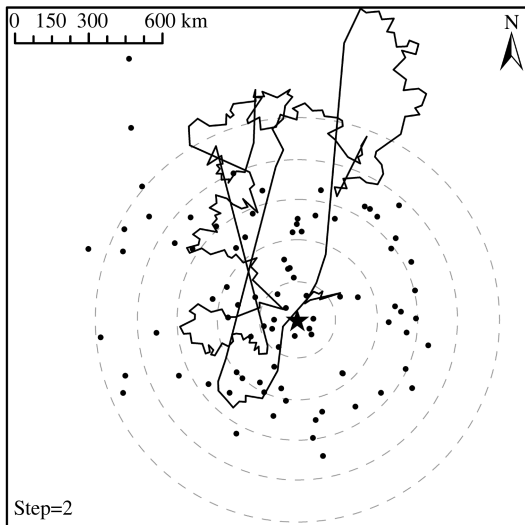


图 6 受力计算未约束的同心圆式等时线地图

Fig.6 CMap in Which the Forces are not Controlled

表 4 地理边界简化程度对实验结果及效率的影响统计分析

Tab.4 Statistical Results of the Influence on CMap and Efficiency Using Geographic Boundaries at Different Levels of Detail

化简 程度	$N_{cc}$	$N_{qc}$	$N_{sc}$	Ratio	Step	$t/s$	后处理 次数
0.5°	86	39	125	2.21	109	118.9	20
0.2°	86	108	194	0.80	122	231.7	8
0.1°	86	192	278	0.45	76	465.2	3
0.05°	86	422	508	0.20	129	5 760.1	6
0.02°	86	1 189	1 275	0.07	129	105 964.1	4

因达到最大迭代次数而终止,并产生部分需后处理的拓扑错误。综合考虑算法效率和后处理次数,实际应用中 Ratio 应控制在 0.5 左右,可参考该指标确定地理边界需表达的详细程度。

## 5 结 语

为有效生成表达各点到中心点时间距离的中心型地图,本文将中心型地图的构建过程建模为地图综合中的移位问题,应用经典的 Snake 线状网络移位方法迭代计算点的新位置生成中心型地图。其中,Snake 算法的应用需要将地图要素表达为线状网络并计算初始受力,本文以 RNG 表达点之间的邻近关系构建线状网络,并基于控制点的位置移动计算线状网络的初始受力。实验结果表明,本文方法相比已有方法能更好地避免拓扑错误且局部形态保持更好。但是 Snake 算法涉及较多的矩阵计算,本文方法计算效率会随着数据规模的扩大而亟剧降低,因此研究高效的

矩阵运算策略提高方法效率是未来研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang Haibing, Xu Jiangang, Qi Yi. The Influence of Beijing-Shanghai High-Speed Railways on Land Accessibility of Regional Center Cities [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(10): 1287-1298 (蒋海兵, 徐建刚, 祁毅. 京沪高铁对区域中心城市陆路可达性影响[J]. 地理学报, 2010, 65(10): 1287-1298)
- [2] Wang Lina, Li Xiang, Jiang Nan, et al. A New Method of Constructing a Central Time-Space Map [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(1): 123-132 (王丽娜, 李响, 江南, 等. 中心型时间地图的构建方法与实践[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 123-132)
- [3] Wang Lina, Jiang Nan, Li Xiang, et al. A Survey of Cartogram [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(3): 393-405 (王丽娜, 江南, 李响, 等. Cartogram 表示方法研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(3): 393-405)
- [4] Nusrat S, Kobourov S. The State of the Art in Cartograms [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(3): 619-642
- [5] Hong S, Kim Y S, Yoon J C, et al. Traffigram: Distortion for Clarification via Isochronal Cartography [C]//The SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, New York, USA, 2014
- [6] Bies S, van Kreveld M. Time-Space Maps from Triangulations [M]// Heidelberg: Springer, 2013
- [7] Ullah R, Kraak M J. An Alternative Method to Constructing Time Cartograms for the Visual Representation of Scheduled Movement Data [J]. *Journal of Maps*, 2015, 11(4): 674-687
- [8] Wang Lina. Research on Automatic Construction Method and Application of Cartogram [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (王丽娜. Cartogram 自动构建方法与应用研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2018)
- [9] Burghardt D, Meier S. Cartographic Displacement Using the Snake Concept [J]. *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Basel, Birkhäuser Verlag, 1997, 7: 59-71
- [10] Liu Yuangang. Research and Improvement of Cartographic Displacement Algorithms Based on Energy Minimization Principles [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015 (刘远刚. 基于能量最小化原理的地图要素移位算法研究与改进[D]. 武汉: 武汉大

- 学, 2015)
- [11] Liu Y G, Guo Q S, Sun Y G, et al. A Combined Approach to Cartographic Displacement for Buildings Based on Skeleton and Improved Elastic Beam Algorithm[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e113953
- [12] Guo Qingsheng, Zhou Lin, Wang Lin, et al. Improvement of Snake Displacement Model for Roads Considering Cartographic Rules[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1629-1634 (郭庆胜, 周林, 王琳, 等. 顾及制图规则的道路Snake移位模型改进[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(11): 1629-1634)
- [13] Wei Z W, Su D J, Xu W J, et al. Circular Cartograms via the Elastic Beam Algorithm Originated from Cartographic Generalization[J]. *arXiv*, 2022, DOI:2204.12645
- [14] Ai Tinghua. A Spatial Field Representation Model Based on Delaunay Triangulation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1): 71-76 (艾廷华. Delaunay三角网支持下的空间场表达[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 71-76)
- [15] Guo Qingsheng, Wei Zhiwei, Wang Yong, et al. The Method of Extracting Spatial Distribution Characteristics of Buildings Combined with Feature Classification and Proximity Graph[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 631-638 (郭庆胜, 魏智威, 王勇, 等. 特征分类与邻近图相结合的建筑物群空间分布特征提取方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 631-638)
- [16] Wei Z W, Guo Q S, Wang L, et al. On the Spatial Distribution of Buildings for Map Generalization[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2018, 45(6): 539-555
- [17] Bader M. Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalization[D]. Zurich: University of Zurich, 2001
- [18] Regnaud N. Contextual Building Typification in Automated Map Generalization[J]. *Algorithmica*, 2001, 30(2): 312-333
- [19] Wei Zhiwei, Guo Qingsheng, Cheng Lu, et al. Shape Similarity Measurement Based on DNA Alignment for Buildings with Multiple Orthogonal Features[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(12): 1683-1693 (魏智威, 郭庆胜, 程璐, 等. 建筑物图形形状相似性计算的序列分析法[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1683-1693)
- [20] Liu Pengcheng, Ai Tinghua, Hu Jinshan, et al. Building-Polygon Simplification Based on Shape Matching of Prototype Template[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11): 1369-1372 (刘鹏程, 艾廷华, 胡晋山, 等. 基于原型模板形状匹配的建筑物多边形化简[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11): 1369-1372)

## Central Time-Space Map Construction Using the Snake Model

WEI Zhiwei<sup>1,2</sup> LIU Yuangang<sup>3</sup> XU Wenjia<sup>4</sup> WANG Yang<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Network Information System Technology, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100830, China

2 The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100830, China

3 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4 School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract: Objectives:** The central time-space maps deform the map space to visualize the one-to-many time distance, which can intuitively reflect the distance changes due to the influence of a traffic system. The core of the central time-space map construction is to calculate the non-control points' locations based on the control points' displacements. Displacement is a basic operation in cartographic generalization and many approaches have been developed. **Methods:** We model the central time-space map construction as a problem of displacement in cartographic generalization, use the relative neighborhood graph to express the proximity relations between the points, and the initial forces on the points are computed based on the control points' displacements. And the Snake model is applied iteratively based on the built graph to obtain the new locations of all points, post operations are also applied to avoid topology errors in the iterative process. **Results and Conclusions:** Compared to the existing approaches, the proposed method can reduce the topology

(下转第2122页)



and the elements to be visualized are described. After that, the existing visualization products of cyberspace map are widely collected, and the visualization methods of elements are sorted out. The visualization methods of cyberspace map are summarized into three categories: Map, topology map and knowledge map. Finally, the research progress is summarized and analyzed. It is considered that the basic theory of cyberspace map visualization, the mapping between cyberspace and geographical space, and the visualization of virtual form elements are the future research direction.

**Key words:** cyberspace; cyberspace map; cyberspace component; cyberspace visualization

**First author:** ZHANG Lan, PhD candidate, specializes in cyberspace map. E-mail: ranhou0611@163.com

**Corresponding author:** JIANG Bingchuan, PhD, associate professor. E-mail: jbc021@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(4217011789, 42171456).

**引文格式:** ZHANG Lan, WANG Guangxia, JIANG Bingchuan, et al. A Review of Visualization Methods of Cyberspace Map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(12): 2113-2122. DOI: 10.13203/j.whugis20220244 (张兰, 王光霞, 蒋秉川, 等. 网络空间地图可视化方法研究综述[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(12): 2113-2122. DOI: 10.13203/j.whugis20220244)

(上接第 2112 页)

errors and improve the shape similarity for the deformed boundaries, and can better avoid topology errors and maintain the local morphologies.

**Key words:** central time-space map; spatialtemporal visualization; time-space map; spatial deformation; displacement algorithm

**First author:** WEI Zhiwei, PhD, assistant researcher, specializes in intelligent handling and visualization of geospatial data. E-mail: 2011301130108@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41871378).

**引文格式:** WEI Zhiwei, LIU Yuangang, XU Wenjia, et al. Central Time-Space Map Construction Using the Snake Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(12): 2105-2112, 2122. DOI: 10.13203/j.whugis20220553 (魏智威, 刘远刚, 许文嘉, 等. 利用Snake移位模型构建中心型地图[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(12): 2105-2112, 2122. DOI: 10.13203/j.whugis20220553)