

三维地理场景下带引线点要素注记优化配置的 Beams 移位方法

魏智威^{1,2)}, 杨乃³⁾, 许文嘉⁴⁾, 丁愫⁵⁾, 李敏敏^{2)*}, 李游²⁾, 郭仁忠^{2,6)}

¹⁾(湖南师范大学地理科学学院 长沙 410006)

²⁾(人工智能与数字经济广东省实验室(深圳) 深圳 518132)

³⁾(中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院 武汉 430074)

⁴⁾(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

⁵⁾(浙江农林大学环境与资源学院 杭州 311300)

⁶⁾(深圳大学建筑与城市规划学院智慧城市研究院 深圳 518060)

(liminmin@gm1.ac.cn)

摘要: 在三维地理场景中, 通过为点要素添加带引线的注记可以显著提高目标的可辨识性。针对现有启发式引线注记配置方法未能有效利用图面空间且难以顾及注记间相对关系的问题, 提出 1 种适用于三维地理场景注记配置的 Beams 移位方法。首先通过三角网建模注记间空间关系; 然后依据注记间相对关系计算注记受力, 并结合 Beams 移位方法迭代计算注记新位置; 最后, 探讨了提升注记配置效率的分块处理策略, 并分析了不同邻近图构建策略对配置结果的影响。实验结果表明, 在自建的船舶定位和兴趣点 2 个数据集中, 所提方法注记配置结果冲突数量均为 0, 且邻近注记间相对方向偏差分别减小了 8.53° 和 1.59°; 同时, 所提方法也能够适应不同类型引线注记的配置需求。

关键词: 地理场景; 三维可视化; 注记配置; 地图综合; 移位算法

中图法分类号: P208 DOI: 10.3724/SP.J.1089.2024-00619

Optimized 3D Point Labeling with Leaders Using the Beams Displacement Method

Wei Zhiwei^{1,2)}, Yang Nai³⁾, Xu Wenjia⁴⁾, Ding Su⁵⁾, Li Minmin^{2)*}, Li You²⁾, and Guo Renzhong^{2,6)}

¹⁾(School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410006)

²⁾(Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (Shenzhen), Shenzhen 518132)

³⁾(School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074)

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

⁵⁾(College of Environmental and Resource Science, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300)

⁶⁾(Research Institute for Smart City, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: In three-dimensional geographical scenes, adding labels with leader lines to point features can significantly improve their visibility. To address the limitations of existing heuristic leader label configuration methods, which fail to effectively utilize the map space and struggle with the relative relationships between labels, we propose a Beams displacement method suitable for label configuration in 3D geographic scenes. First, the spatial relationships between labels are modeled using a triangular graph. Then, the forces on the labels are calculated based on their relative positions, and the new label positions are iteratively computed using the Beams displacement method. Finally, we explore a block-processing strategy to improve

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2025-02-10. 基金项目: 国家自然科学基金(42171438); 国家重点研发计划(2023YFC3804800). 魏智威(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为地理可视化、三维重建等; 杨乃(1984—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地图可视化、时空大数据可视化分析与应用等; 许文嘉(1994—), 女, 博士, 特聘副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为多源遥感数据智能解译、计算机视觉、三维重建等; 丁愫(1992—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为地理建模、数据挖掘等; 李敏敏(1988—), 女, 博士, 副研究员, 论文通信作者, 主要研究方向为地理可视化、大数据分析、知识图谱技术等; 李游(1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为地理信息系统、3D 计算机视觉、数字孪生等; 郭仁忠(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智慧城市等。

label configuration efficiency and analyze the impact of different proximity graph construction strategies on the configuration results. Experimental results show that in the self-constructed ship positioning and point of interest datasets, the proposed method resulted in zero label conflicts, with the relative direction deviations between adjacent labels reduced by 8.53° and 1.59° , respectively. Additionally, the method can adapt to the configuration needs of various types of leader annotations.

Key words: geographical scene; 3D visualization; label placement; map generalization; displacement algorithm

随着信息通信技术特别是人工智能、虚拟/增强现实等新技术的发展,地图表达形式逐渐从静态信息描述扩展为多维动态空间信息可视化^[1-2]。其中,注记通过文字传递目标语义信息精准直观,是地图语言的重要组成,也是三维可视化表达的核心要素^[3]。

注记要素的数据类型分为点、线、面和体,考虑到通常以屏幕为主要显示载体,体在标注时亦可视为特殊的面或点处理^[4]。其中,点要素注记配置因其求解的复杂性,一直是现有研究的重点,相关工作可分为局部优化和全局优化。局部优化方法关注单个或局部注记的配置,强调结合注记配置规则量化注记位置得分,并依据得分依次确定注记的最优位置。文献[5-6]综合考虑压盖、位置优先级和位置关联性等,结合模拟退火方法确定注记位置;文献[7]综合考虑位置优先级、清晰易读性等,结合禁忌搜索算法确定注记位置;文献[8]基于备选位置与背景要素的压盖程度进行打分确定注记位置,文献[9-10]则基于要素压盖结构量化得分确定注记位置。局部优化方法具有配置简单、效率高等优势,但易陷入局部最优,有时无法获取满足要求的配置结果。全局优化方法利用遗传算法、蚁群算法等全局优化方法,将所有点要素视为整体进行解算。文献[11-12]考虑位置优先级和注记冲突,分别结合遗传算法和蚁群算法实现了注记配置;考虑到遗传算法可能存在局部收敛问题,文献[13]将粒子群算法和遗传算法结合实现注记配置,文献[14]则将遗传算法和禁忌搜索算法结合实现注记配置。但是,随着要素数量的增多,全局优化的组合呈爆炸式地增长,导致求解效率低且质量不佳,故部分学者考虑结合点要素空间分布特征指导注记配置以提高效率,如采用聚类方法将整体划分为多个子群求解^[15-16],或结合注记分布密度规划注记配置次序^[17-18]。为了评价注记配置的质量,研究人员也提出了一系列评价指标,包括注记数量、重叠率、注记关联度、引导线总长度和

引导线交叉数量等^[19-20]。

随着三维应用的普及,研究人员尝试结合三维可视化特点将上述方法扩展至三维场景。文献[21]考虑三维场景近大远小等特点,将遗传算法用于三维场景中点要素注记的配置;文献[22-23]则考虑三维场景语义结构,将启发式方法用于建筑物注记的配置;但是,上述方法多要求注记与对应点要素紧密邻接,在视角频繁变换的三维场景中易产生指代对象不明等问题,故部分学者利用引线连接点要素和注记提高指代对象的一致性。文献[24]提出一种尺度自适应的带引线点要素注记配置方法,有效地实现了三维地形场景下的地名标注;文献[25]结合动态规划策略,提出适于建筑物的带引线注记标注方法;文献[26]通过对比三维室内场景下带引线注记和纹理贴附式注记的优劣,证明了带引线注记能更明确和完整地表达目标信息;但是,上述带引线的点要素注记配置方法仍多以有限位置候选模型为基础,既未有效地利用图面空间,也难以顾及注记间相对关系。实际上,由于注记与对应点要素以引线连接,因此与已有方法相比,其在位置配置上具有更大的自由度^[27],有必要针对三维地理场景下带引线点要素注记设计合适的配置方法,以提高注记配置质量。

当前,三维地理场景下带引线点要素注记配置的核心是在考虑三维地理场景特点的同时,通过移动注记获取满足配置约束的结果。移位是地图综合领域的基础操作,已有较多成熟的地图要素移位方法,如适于面要素移位的Beams移位算法能在移动面要素的同时保持要素间空间关系^[28-29]。由于三维地理场景目前仍多面向二维屏幕进行显示,若将二维屏幕上的注记以文字占据的绑定矩形代替,就能将注记的配置问题建模为面要素移位问题;同时,若利用Beams移位算法移位,亦能有效地保持要素间空间关系。因此,本文将三维地理场景下带引线点要素注记的配置过程建模为面要素移位问题,设计相应的注记位置优化配置

Beams 移位方法.

1 问题定义

1.1 问题描述

本文针对三维地理场景中带引线点要素注记, 研究其位置配置方法. 其中, 直线是目前普遍采用的引线形式, 依据直线引线的方向和引线与注记连接点的性质, 可以将其划分为 4 类: 类型 1. 引线方向固定, 连接点位置固定(图 1a); 类型 2. 引线方向不固定, 连接点位置固定(图 1b); 类型 3. 引线方向不固定, 连接点位置不固定(图 1c); 类型 4. 引线方向固定, 连接点位置不固定(图 1d). 其中, 若引线方向不固定易造成图面混乱, 而连接点位置固定则会减小注记位置的自由度, 故类型 4 引线在实际应用较为广泛, 本文研究亦针对类型 4 注记研究其配置方法, 该方法可扩展至另外 3 类.

本文问题定义为: 给定二维屏幕上待显示的点要素集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 依据引线参数(用户设置的长度、方向和连接点), 以及要素标注字段可确定注记的初始位置和内容, 点要素与对应注记以引线连接; 注记可用其绑定矩形表示, 记为 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, 点要素与其注记的引线连接点集合记为 $P' = \{p'_1, p'_2, \dots, p'_m\}$, 点 p_m 与注记的引线即为 $p_m p'_m$, 移动 R 中的注记并更新 P' 以获取满足约束条件的配置结果, 约束条件定义见第 1.2 节.

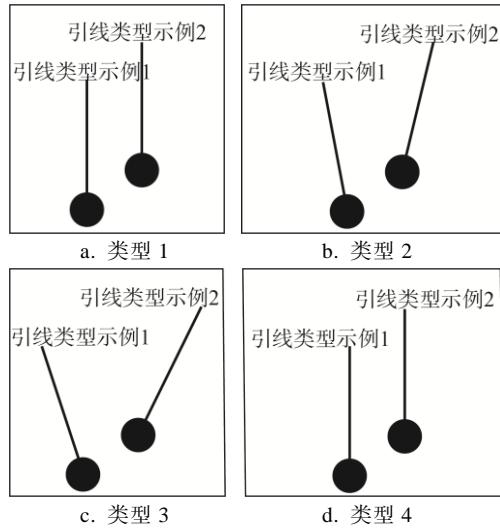


图 1 引线注记分类

1.2 配置约束定义

三维地理场景中, 注记配置在考虑三维场景表达特殊性的同时也必须遵循相应的可视化原则. 本文参考文献[21,26,28], 总结了三维地理场景中

带引线点要素注记配置的表达需求.

(1) 几何约束. a. 位置. 在固定引线方向前提下, 注记的位置不能横向偏离对应点要素距离过大, 否则无法保证引线连接点与注记连接. b. 尺寸. 注记尺寸需符合三维场景近大远小的表达要求.

(2) 空间关系. a. 距离关系. 为了保证三维场景的可读性, 注记与注记间或注记与已有其他图面要素(如点要素)间的距离应大于一定阈值 d_{\min} . 例如, 在距离目标 30 cm 的情况下, 人眼能分辨的最小间隔距离为 0.2 mm^[2]. b. 拓扑关系. 注记与注记或注记与点要素间不能产生压盖. c. 空间方向关系. 注记间的空间方向关系应尽量反映注记对应点要素间的空间方向关系.

(3) 空间分布. 注记的总移动距离应尽可能小.

需要说明的是, 三维地理场景复杂多样, 实际应用中, 用户也可依据需要调整或扩展配置约束, 如可能会考虑场景的结构特征等进行配置^[4,22,27]. 另外, 考虑到引线的宽度较小, 在应用中通常不考虑引线与注记或已有图面要素间的交叉.

2 本文方法

Beams 移位方法多用于面状要素的移位, 其原理是将面要素用邻近图关联, 并将邻近图类比材料力学中的杆件结构; 由于面要素距离过近或压盖而产生冲突需要移动(即对杆件结构施加力), 杆件因力的作用发生形变或位移而产生能量, 通过求解能量最小化问题, 即可计算杆件移位和变形后的最优形状和位置. Beams 移位方法的求解过程详见文献[28]. 因此, 利用 Beams 移位方法进行注记配置需要完成如下步骤: (1) 依据注记配置设置生成初始结果; (2) 将注记对应的绑定矩形关联为邻近图; (3) 依据第 1.2 节的注记配置约束计算邻近图受力; (4) 基于构建的邻近图及其受力, 利用 Beams 移位算法迭代求解获取邻近图中各点的新位置, 即优化后的注记位置.

2.1 初始注记布局

依据第 1.1 节的问题描述, 给定点要素集合 P , 依据用户设置的引线长度、方向、初始引线连接点位置和最大注记字号 W_{\max} , 可生成点要素注记的初始布局 R 和 P' , 如图 2a 所示. 其中, 注记的字号由视点到点要素的平面距离决定. 假设离视点最近的点为 p_{nearest} , 其字号即为 W_{\max} ; 给定点 p_m , 视点到 p_m 的平面距离为 d_m , 则 p_m 的字号

W_m 的计算公式为

$$W_m = \frac{d_{\text{nearest}}}{d_m} \times W_{\max}.$$

其中, d_{nearest} 表示视点到 p_{nearest} 的平面距离; 考虑到人眼对字符的可辨识度, 字号需大于一定阈值 W_{\min} , 若 $W_m \leq W_{\min}$, 则 $W_m = W_{\min}$.

2.2 邻近图构建

三角网(Delaunay triangulation, DT)以图的形式表达地图目标间邻近关系和空间分布, 能有效地反映地图目标间的相互联系^[30]. 因此, 本文采

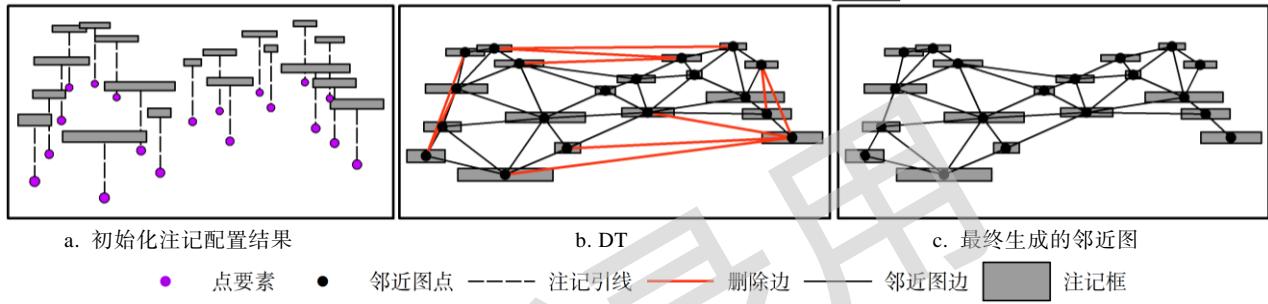


图 2 邻近图构建

2.3 力的计算

Beams 移位方法用于面状要素移位时, 若面要素之间距离小于阈值或压盖(即发生冲突), 则会产生力; 同理, 若注记之间或注记与其他图面要素(如点要素)之间的距离小于阈值或压盖, 也会发生冲突, 即对邻近图产生力.

(1) 注记之间的斥力计算

若 2 个注记相离但距离小于阈值 d_{\min} , 则需要为 2 个注记施加使它们相离的斥力 f_l 和 f_r , 以保证注记间距离大于 d_{\min} , 计算公式为

$$f_l = 0.5 \times \frac{\mathbf{p}_r \mathbf{p}_l}{|\mathbf{p}_r \mathbf{p}_l|} \times (d_{\min} - |\mathbf{p}_r \mathbf{p}_l|),$$

$$f_r = 0.5 \times \frac{\mathbf{p}_l \mathbf{p}_r}{|\mathbf{p}_l \mathbf{p}_r|} \times (d_{\min} - |\mathbf{p}_l \mathbf{p}_r|).$$

其中, \mathbf{p}_l 和 \mathbf{p}_r 表示左、右 2 个注记上相距最近的点, 如图 3a 所示.

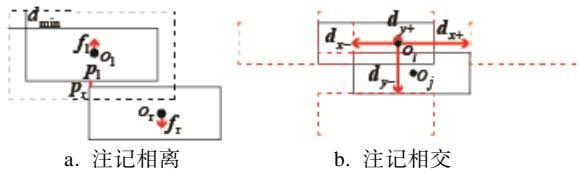


图 3 注记冲突时力的计算

若 2 个注记相交, 则需要为 2 个注记施加使它们相离的斥力, 以保证注记不相交且注记间距离大于 d_{\min} . 将注记以绑定矩形替代, 可以在二维屏幕的 $x-$, $x+$, $y-$, $y+$ 这 4 个方向上分别计算使注记

用 DT 表达注记间相互关系, 如图 2b 所示. 其中, 若 DT 关联的 2 个注记距离较远或被其他注记阻隔, 注记实际上不邻近, 因此, 需要删除 DT 中长度大于阈值 T_d 的边和穿过注记的边. 邻近图构建流程如下:

(1) 以注记的绑定矩形中心点集构建 DT, 结果如图 2b 所示;

(2) 删除 DT 中距离较长的边和穿过注记的边, 如图 2b 中红色边, 邻近图生成结果如图 2c 所示.

间距离大于 d_{\min} 的受力, 注记的最终受力可依据 4 个方向上的最小受力计算. 假设表示 2 个注记的绑定矩形 r_i 和 r_j 分别记为 $[x_{\min}^i, y_{\min}^i, x_{\max}^i, y_{\max}^i]$ 和 $[x_{\min}^j, y_{\min}^j, x_{\max}^j, y_{\max}^j]$. 其中, x_{\min} , y_{\min} , x_{\max} , y_{\max} 分别表示绑定矩形在 x 方向和 y 方向上的最小值和最大值, 则沿 $x-$, $x+$, $y-$, $y+$ 这 4 个方向移动 r_i 使其与 r_j 距离大于 d_{\min} 的受力 f_{x-} , f_{x+} , f_{y-} , f_{y+} 如图 3b 所示, 计算公式为

$$\begin{cases} f_{x-} = x_{\max}^i - x_{\min}^j + d_{\min} \\ f_{x+} = x_{\max}^j - x_{\min}^i + d_{\min} \\ f_{y-} = y_{\max}^i - y_{\min}^j + d_{\min} \\ f_{y+} = y_{\max}^j - y_{\min}^i + d_{\min} \end{cases}.$$

其中, 移动 r_j 使其与 r_i 距离大于 d_{\min} 的过程与移动 r_i 使其与 r_j 距离大于 d_{\min} 的过程对偶. 故 2 相交注记的受力大小分别为 $0.5 \times \min(|f_{x-}|, |f_{x+}|, |f_{y-}|, |f_{y+}|)$, r_i 的移动方向为力 $\min(|f_{x-}|, |f_{x+}|, |f_{y-}|, |f_{y+}|)$ 方向, r_j 与 r_i 移动方向相反.

(2) 注记与已有图面要素间的斥力计算

若注记与已有图面要素之间的距离小于阈值或产生压盖, 则需要对注记施加远离该要素的斥力. 以注记与点要素存在冲突为例, 由于点要素无

法移动, 存在冲突时则需要对注记施加远离对应点要素的斥力; 但是, 若注记受到来自 2 个相反方向的点要素斥力, 则仅靠注记移动无法解决该冲突. 为了避免上述问题, 本文对存在冲突的注记在 $x-$, $x+$, $y-$, $y+$ 这 4 个方向上分别计算可能解决其与对应点要素冲突的斥力, 如图 4a 所示, 计算公式为

$$\begin{cases} f_{x-} = \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x-}}{|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x-}|} (|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x-}| + d_{\min}) \\ f_{x+} = \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x+}}{|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x+}|} (|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{x+}| + d_{\min}) \\ f_{y-} = \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y-}}{|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y-}|} (|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y-}| + d_{\min}) \\ f_{y+} = \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y+}}{|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y+}|} (|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{y+}| + d_{\min}) \end{cases}.$$

其中, \mathbf{p}_i 表示点要素; \mathbf{p}_{x-} , \mathbf{p}_{x+} , \mathbf{p}_{y-} 和 \mathbf{p}_{y+} 表示点 \mathbf{p}_i 到注记绑定矩形 4 个方向上的投影点. 若注记只与 1 个点要素冲突, 则其受力为 $\min(|f_{x-}|, |f_{x+}|, |f_{y-}|, |f_{y+}|)$; 若注记受到来自多个点要素的斥力, 则需依据文献[25]中力的合成方法, 依次选择来自不同点要素的 1 个同方向(夹角 $\leq 90^\circ$)斥力进行合成, 合成后值最小的力即为该注记受力.

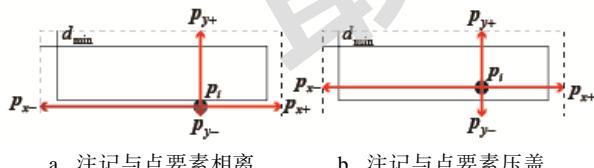


图 4 点要素与注记冲突时力的计算

(3) 引线连接点与注记之间的吸引力计算

由于本文引线方向设置为固定, 若注记横向移位距离过大则无法保证引线与注记连接, 因此需要为其添加吸引力 f_{atr} 保证引线与注记相连, 计算公式为

$$f_{atr} = \mathbf{p}'_i \mathbf{p}'_{\text{nearest}}.$$

其中, \mathbf{p}'_i 表示引线连接点; $\mathbf{p}'_{\text{nearest}}$ 表示 \mathbf{p}'_i 到对应注记的最近点.

(4) 屏幕边缘斥力计算

由于注记不能超出屏幕边缘, 因此若注记与屏幕边缘间的距离小于距离阈值 d_{\min} , 则屏幕边缘会对注记施加斥力 f_{screen} , 计算公式为

$$f_{screen} = \frac{\mathbf{p}_s \mathbf{p}_r}{|\mathbf{p}_s \mathbf{p}_r|} \times (d_{\min} - |\mathbf{p}_s \mathbf{p}_r|).$$

其中, \mathbf{p}_s 和 \mathbf{p}_r 表示屏幕与注记上距离最近的 2 点.

2.4 迭代求解

通常, 仅执行 1 次移位算法无法保证解决所有冲突, 尤其是当注记密度较大时. 本文参考文献[28], 采用迭代策略求解. 迭代终止条件如下: (1) Beams 移位方法执行次数 B_{step} 到设定的阈值 T_{step} , 若 $B_{\text{step}} \geq T_{\text{step}}$, 则算法终止; (2) 若执行 Beams 移位方法时各注记受力较小, 即一定程度上可认为已解决冲突而无需移位, 可基于上一移位过程中各注记的最大受力 $\max(f_{t-1})$ 定义; 若 $\max(f_{t-1}) \leq T_f$, 则算法终止, T_f 为 1 次移位过程中注记的最小受力阈值; 本文取 $T_f = \varepsilon$, 其中, ε 表示极小值, 实际应用中可由用户设置, 如取 $T_f = 0.1 \times d_{\min}$.

算法 1. 注记位置优化配置的 Beams 移位算法

输入. 点要素集合 P , P 对应的最小绑定矩形集合 R , P 与其注记牵引线的连接点集合 P' , 点 p_m 的牵引线为 $p_m p'_m$, 迭代次数的终止阈值 T_{step} , 注记间或注记与其他要素间的最小距离阈值 d_{\min} .

输出. 移位后的 R 和 P' .

初始化. 迭代次数 $B_{\text{step}} \leftarrow 1$, 记录上 1 次迭代处理的最大注记移位量为 $\max(f_{t-1}) \leftarrow 0$.

Do

 依据 R 的中心构建 DT 并调整;

 计算注记的移位向量;

 基于 Beams 移位方法计算移位向量, 最大移位量为 $\max(f_t)$, $\max(f_{t-1}) \leftarrow \max(f_t)$;

 依据移位向量更新 R 和 P' 的位置;

$B_{\text{step}} \leftarrow B_{\text{step}} + 1$;

 While ($B_{\text{step}} \leq T_{\text{step}}$ OR $\max(f_{t-1}) \geq 0.1 \times d_{\min}$);

 Return R 和 P' .

3 实 验

3.1 实验设置

(1) 实验数据. 采用 MapBox 公司提供的三维地理场景为底图, 展示 2 种典型点要素: a. 船舶自动定位(automatic identification system, AIS)数据. 选取 2022-10-10 中国近海 AIS 部分数据, 该数据由东海船舶轨迹数据(脱敏)编制而成, 船舶数量为 47; b. 兴趣点(point of interest, POI)数据. 选择 MapBox 提供的苏黎世中心城区部分 POI 数据为实验数据, POI 数量为 76.

(2) 评价指标. 依据第 1.2 节注记配置约束评

价注记配置结果, 包括: a. 注记间冲突个数 N_{r-r} (距离小于阈值 d_{min} 或压盖). b. 已有图面要素与注记间冲突个数 N_{r-p} (距离小于阈值 d_{min} 或压盖). c. 所有注记移位总长度 D_{sum} . d. 邻近注记间相对方向的平均偏差 A_{ms} , 定义为^[29]

$$A_{ms} = \frac{\sum_{m=1}^N \Delta O_m}{N}.$$

其中, N 表示第 2.2 节定义的邻近图中边的数量; ΔO_m 表示移位前后对应边的方向偏差, 定义为

$$\Delta O_m = \begin{cases} |O_{ij} - O'_{ij}|, & (|O_{ij} - O'_{ij}| < 90) \\ 180 - |O_{ij} - O'_{ij}|, & (|O_{ij} - O'_{ij}| \geq 90) \end{cases}.$$

O_{ij} 和 O'_{ij} 表示移位前后对应边的方向. e. 采用算法耗时 t 评价运行效率.

(3) 实验环境. 基于 MapBox JS 实现本文方法, 实验平台为 1 台 AMD Ryzen 7-7840HS w/ Radeon 780M Graphics @3.80 GHz CPU, 16 GB 内存, Windows 11(64 位)操作系统的计算机.

(4) 参数设置. AIS 数据的注记初始布局参数设置如下: 引线长度为 1.5 cm、初始引线连接点位置为注记底端中点、最大注记字号为 12 磅. POI 数

据的注记初始布局参数设置如下: 引线长度为 1 cm、初始引线连接点位置为注记底端中点、最大注记字号为 12 磅. 考虑到实际应用中引线通常为竖直方向, 故 2 个数据集中引线方向均设置为 90°. 参考地图要素间的最小距离约束设置 $d_{min} = 0.2$ mm, 参考点要素间平均距离 d_{ave} 设置为 $T_d = 3 \times d_{ave}$ ^[2]; 参考文献[28], Beams 移位方法的迭代次数 T_{step} 与注记数量 P_{count} 相关, 设置 $T_{step} = P_{count}$; 为了避免 T_{step} 取值过大或过小, 若 $P_{count} \leq 20$, 则 $T_{step} = 20$; 若 $P_{count} \geq 100$, 则 $T_{step} = 100$. 实际应用时, 用户可依据需要调整上述参数.

(5) 对比方法. 将本文方法与 2 种方法进行对比: a. 不进行注记布局调整, 简称为 NoP; b. 注记局部调整, 简称为 LocalP, 即在局部依据注记间的冲突程度依次调整注记位置以避免注记冲突.

3.2 有效性实验

在 2 个数据集上, 采用 Beams 移位算法对初始注记配置结果进行优化, 并与对比方法进行对比, 结果见表 1 和表 2.

表 1 在 2 个数据集上的注记配置结果对比

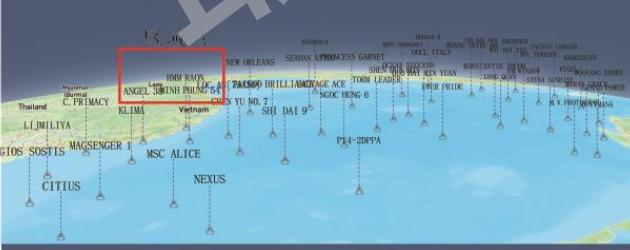
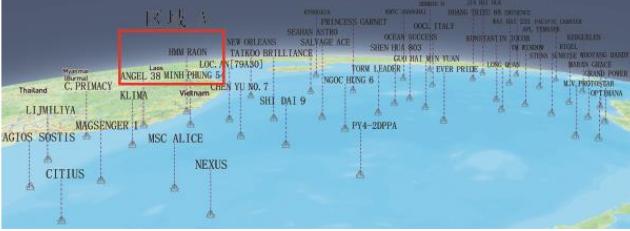
方法	AIS 数据集	POI 数据集
NoP		
LocalP		
本文		

表 2 在 2 个数据集上注记配置评价指标对比

方法	AIS 数据集					POI 数据集				
	N_{r-r}	N_{r-p}	A_{ms} / $^{\circ}$	D_{sum} /cm	t /s	N_{r-r}	N_{r-p}	A_{ms} / $^{\circ}$	D_{sum} /cm	t /s
NoP	26	11	0	0	0	23	26	0	0	0
LocalP	0	0	19.08	12.61	1.02	0	0	12.58	7.44	1.72
本文	0	0	10.55	13.12	7.28	0	0	10.99	6.60	10.34

注. 粗体表示最优值.

从表 1 和 2 可以看出, 注记位置未进行优化配置时, 表 1 中, AIS 数据集中注记间存在 26 个冲突, 注记与已有图面要素间存在 11 个冲突; POI 数据集中注记间存在 23 个冲突, 注记与已有图面要素间存在 26 个冲突. 对注记位置进行配置后, 3 种方法均不存在冲突, 如表 1 中区域 A 和区域 B 所示, 这说明这些方法均能有效地避免注记冲突. 同时, 注记的移动会破坏原有注记间相对关系, 在 AIS 数据集上, 依据本文方法对注记进行配置后 A_{ms} 为 10.55° , 比 LocalP 方法小 8.53° ; 在 POI 数据集上, A_{ms} 则是 10.99° , 比 LocalP 方法小 1.59° . 这是由于 LocalP 方法只移动存在冲突的要素以避免注记冲突, 导致部分注记移动距离较大而破坏了与邻近要素的空间关系. 另外, 由表 1 区域 A 和区域 B 可知, 由于 LocalP 方法仅移动存在冲突的注记, 导致注记 MINH PHUNG54 和 MARTA 均偏移其初始位置较远, 且破坏了与邻近要素间的相对关系, 而本文方法则未出现上述问题. 上述结果说明, 与已有方法相比, 本文方法能更好保持注记间相对关系, 这是由于该方法采用邻近图作为整体框架, 控制了注记移位过程中的空间关系变化. 由于 Beams 移位算法采用全局优化策略, 与已有局部调整方法相比, 在效率上存在差距, 如 AIS 和 POI 数据集中, 本文算法耗时分别为 7.28 s 和 10.34 s, 而 LocalP 方法仅为 1.02 s 和 1.72 s. 但是, 本文方法可以通过划分子群提高效率, 详见第 3.3 节. 同时, 依据本文方法对注记进行配置后, AIS 数据集的 D_{sum} 为 13.12 cm, 比 LocalP 方法多 0.51 cm; POI 数据集的 D_{sum} 为 6.60 cm, 比已有方法少 0.84 cm. 表明 2 种方法在注记移位总长度上均未表现出明显优势.

3.3 高效性实验

(1) 效率分析

选取分别包含 10, 30, 60, 120, 200, 500 和 1 000 个 AIS 注记点的视图(简称为 A~G)进行注记配置, 分析本文方法效率. 在保持相同的参数设置下, 实验结果见表 3. 可以看出, 当注记数量大于 200 时, 应用本文方法仍然存在 21 个冲突, 即移动

注记已无法避免冲突, 这是由于视图图面空间有限所致, 即同 1 个视图无法显示过多注记; 算法迭代次数 B_{step} 与注记点个数无明显关系; 算法耗时 t 随着注记点个数的增大而明显增大, 当点总数量超过 60 时, 耗时超过 8 s, 这是由于 Beams 移位算法涉及较多的矩阵计算, 其计算效率会随数据规模扩大而降低. 综合考虑算法效率和图面空间限制, 在注记量小于 60 时, 本文方法在一定程度上可满足三维场景注记即时配置要求; 当注记数量较多时, 可能需要先对注记数量进行删除, 避免图面要素过多.

表 3 效率分析

视图	B_{step}	t /s	N_{r-r}
A	4	0.33	0
B	18	1.23	0
C	47	8.10	0
D	66	207.10	0
E	100	891.20	21
F			
G			

(2) 加速策略

由表 3 可知, 当图面要素超过 60 时, 本文方法的配置效率大于 8 s. 为了满足注记的快速配置要求, 仍需要优化本文方法以提高效率. 参考文献 [17-18], 采用聚类方法将注记群整体划分为多个子群求解. 基于最小生成树(minimum spanning tree, MST)进行空间聚类是较常采用的做法, 本文亦基于注记间最短距离构建 MST, 通过依次删除 MST 中的长边, 将注记划分为多个子群分别进行处理, 子群划分的终止条件为子群中注记的数量 T_{num} ^[30]. 分别取 T_{num} 为 10, 20, 30 和 ∞ , 对第 3.1 节中的 AIS 数据集进行划分(点要素数量为 47), 对划分后的子群分别利用 Beams 移位方法求解并统计算法耗时, 结果见表 4. 可以看出, 对注记划分为子群处理后可以有效地提高算法效率, 子群划分越小, 效率提高越明显, 当 T_{num} 分别为 10, 20, 30 和 ∞ 时, 算法耗时分别为 0.42 s, 1.33 s, 4.24 s 和

7.28 s；随着子群的划分， D_{sum} 和 A_{ms} 也会增大；但是， A_{ms} 仍都小于 LocalP 方法的 19.08° ，分别小 7.93° 、 8.24° 和 8.15° 和 8.53° 。

表 4 效率分析

T_{num}	$N_{\text{r-r}}$	$N_{\text{r-p}}$	$A_{\text{ms}} / (\circ)$	$D_{\text{sum}} / \text{cm}$	t / s
10	0	0	11.15	13.35	0.42
20	0	0	10.84	13.24	1.33
30	0	0	10.93	13.18	4.24
∞	0	0	10.55	13.12	7.28

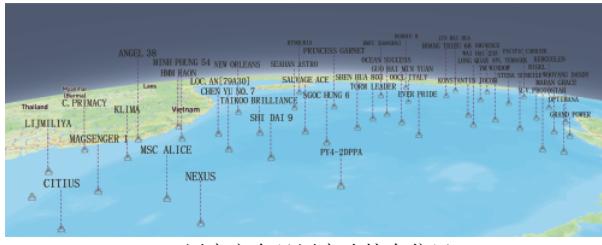
4 讨 论

4.1 引线类型调整

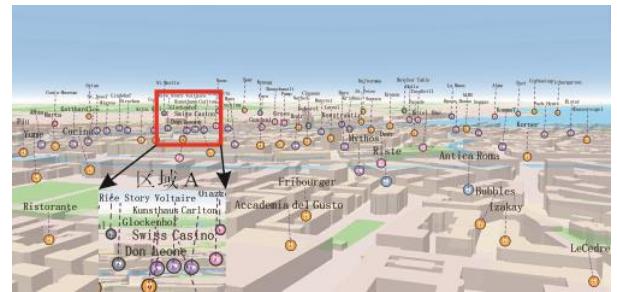
实际应用中,注记的引线类型有时会依据用户需要进行调整(见第1.1节引线类型的划分),本文方法亦可灵活地扩展,适应不同引线类型的注记配置.

(1) 引线方向固定且连接点位置固定

引线方向固定且连接点位置固定, 即注记只能沿引线的固定方向移动, 如设置引线方向为 90°, 则注记只能沿竖直方向上下移动. 因此, 若生成的注记在水平方向上超出屏幕边缘, 则仅靠移动注记无法避免此类问题, 需对注记及其对应点要素做删除处理, 如表 1 中的注记 AGIOS SOSTIS. 在受力计算时, 需以引线方向为主轴对注记的受力进行分解, 仅保留注记在固定方向上的受力; Beams 移位算法迭代求解时, 更新注记的位置时也需将注记的移位向量进行分解, 仅在固定方向上移动注记. 依据上述设置对 AIS 数据集中的注记位置进行配置, 结果见图 5a 和表 5. 可以看出, 本文方法亦可依据上述设置对注记位置进行配置, 且生成结果无冲突, 满足注记配置要求. 对比表 1 和图 5a 可以看出, 由于图 5a 固定了连接点位置, 因此注记的移动空间相对较小, 尽管其 D_{sum} 会减小 2.17 cm, 但是其 A_{ms} 则增大 8.71°. 实际应用中, 若想保持较小的 A_{ms} , 建议选择引线方向固定连接点位置不固定的设置; 反之, 可选择引线方向固定且连接点位置固定的设置.



a. 固定方向且固定连接点位置



b. 不固定方向但固定连接点位置

图 5 注记配置结果

表 5 引线类型分析

数据集	固定方向	固定连接点	$N_{\text{r-r}}$	$N_{\text{r-p}}$	A_{ms} /(^{\circ})	D_{sum} /cm
AIS	✓	✗	0	0	10.55	13.12
	✓	✓	0	0	19.26	10.95
POI	✓	✗	0	0	10.99	6.60
	✓	✓	0	0	10.89	6.31

(2) 引线方向不固定但连接点位置固定

引线方向不固定但连接点位置固定, 即注记可在任意方向上移动, 与引线方向固定而连接点位置不固定的设置相比, 其没有引线连接点超出注记边缘的约束, 不用考虑第 2.3 节中引线连接点与注记之间的吸引力. 依据上述设置对 POI 数据集中的注记位置进行配置, 结果见图 5b 和表 5. 可以看出, 本文方法生成结果无冲突, 满足注记配置要求. 对比表 1 和图 5b 可以看出, 由于图 5b 不固定引线方向, 注记在位置移动上具有更大的自由度, 其 D_{sum} 和 A_{ms} 分别减少 0.10 cm 和 0.29°. 但是, 由于引线方向不固定, 其亦可能带来视觉上的混乱, 如图 5b 中的区域 A. 实际应用中, 可依据注记实际配置的视觉效果选择合理的引线类型, 或结合多种引线类型实现注记配置.

4.2 邻近图影响

本文利用调整后的 DT 表达注记间空间关系, 但描述地图目标间空间关系的邻近图还有 MST 等^[31]. 其中, $MST \subseteq DT$. 因此, 基于 MST 表达注记间空间关系, 并利用本文方法对注记位置进行配置, 结果见图 6 和表 6. 对比表 1 和图 6 可以看出, 利用 MST 表达注记间空间关系亦能生成满足条件的结果, 即注记间或注记与已有图面要素无冲突. 同时, 由表 6 可知, 由于 $MST \subseteq DT$, 即 MST 约束了更少的邻近关系, 其 B_{step} 减少 6 次, t 减少 0.71 s, 效率更高; D_{sum} 减小 33.1%, 为 4.34 cm. 但是, 由于 MST 约束了更少的邻近关系, A_{ms} 也会上升, 增加 0.65°. 实际应用中, 若对效率有更高需要, 可选择 MST 构建邻近图; 若需要较好地保持注记间

的方向关系, 则可选择 DT 构建邻近图.

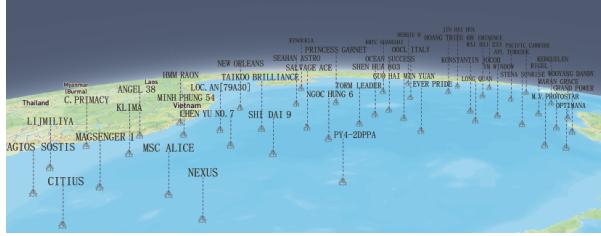


图 6 基于 MST 的 AIS 数据注记位置配置结果

表 6 邻近图影响分析

邻近图	$N_{\text{r-r}}$	$N_{\text{r-p}}$	$A_{\text{ms}} /(^{\circ})$	$D_{\text{sum}} / \text{cm}$	B_{step}	t / s
MST	0	0	11.10	8.78	32	6.57
DT	0	0	10.55	13.12	38	7.28

4.3 字符类型影响

实际应用中, 采用不同语言进行注记. 由于本文实验涉及的 AIS 和 POI 数据集注记均为英文, 因此选择 MapBox 提供的北京市王府井地区 POI 数据集验证本文方法的中文注记支持能力, POI 数量为 88. 注记初始布局配置参数如下: 引线长度为 1 cm、方向为 90°、初始引线连接点位置为注记底端中点、最大注记字号为 12 磅. 实验结果如图 7 所示, 统计分析结果如表 7 所示. 可以看出, 注记位置未进行优化配置时, 注记间存在 12 个冲突, 注记与已有图面要素间存在 18 个冲突; 采用本文方法对注记位置进行配置后, 注记冲突为 0, A_{ms} 为 4.53°, D_{sum} 为 6.12 cm. 实验结果表明, 针对中文注记, 本文方法也能实现无冲突的注记位置配置, 且相对方向偏差较小.



图 7 中文注记配置结果

表 7 注记配置结果评价

配置结果	$N_{\text{r-r}}$	$N_{\text{r-p}}$	$A_{\text{ms}} /(^{\circ})$	$D_{\text{sum}} / \text{cm}$
NoP	12	18	0	0
本文	0	0	4.53	6.12

5 结语

为了有效实现三维地理场景下带引线点要素注记的位置配置, 本文面向二维屏幕显示需要, 将该问题建模为地图面目标移位问题, 应用经典的 Beams 移位方法迭代计算满足配置约束的注记布局. 由于 Beams 移位方法利用邻近图表达注记间空间关系, 并将该邻近图作为整体框架控制注记移位过程中的空间关系变化, 因此本文方法能更好地保持注记间的相对关系, 实验结果也证明了上述结论. 还讨论了结合聚类提高注记配置效率的策略, 并分析了不同邻近图构建策略对实验结果的影响. 但是, 本文主要考虑固定视角下的注记配置质量, 未考虑三维场景中注记随视角变换而动态调整的一致性和配置效率. 未来, 将结合空间索引等研究高效的矩阵运算策略, 综合考虑用户交互过程设计实时的注记配置方法.

参考文献(References):

- [1] Liao Ke. Retrospect and prospect of the development of Chinese cartography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1517-1525(in Chinese)
(廖克. 中国地图学发展的回顾与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1517-1525)
- [2] Zhou Zhiguang, Shi Chen, Shi Linsong, et al. A survey on the visual analytics of geospatial data[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(5): 747-763(in Chinese)
(周志光, 石晨, 史林松, 等. 地理空间数据可视分析综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(5): 747-763)
- [3] He Zongyi, Song Ying, Li Liyaning. Cartography[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2016(in Chinese)
(何宗宜, 宋鹰, 李连营. 地图学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016)
- [4] Yang Nai, Guo Qingsheng, Yang Zuqiao. Research on automatic placement of label in 3D area feature[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(6): 449-453(in Chinese)
(杨乃, 郭庆胜, 杨族桥. 3 维面状要素注记的自动配置研究[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(6): 449-453)
- [5] Christensen J, Marks J, Shieber S. An empirical study of algorithms for point-feature label placement[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1995, 14(3): 203-232
- [6] Edmondson S, Christensen J, Marks J, et al. A general cartographic labelling algorithm[J]. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1996, 33(4): 13-24
- [7] Zheng Chunyan, Guo Qingsheng, Liu Xiaoli. Automatic placement of point annotation based on Tabu search[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(5): 428-431(in Chinese)
(郑春燕, 郭庆胜, 刘小利. 基于禁忌搜索算法的点状要素

- 注记的自动配置[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(5): 428-431)
- [8] Luo Guangxiang, Xu Bin. The study on automatic name placement around point features based on Voronoi[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 2003, 25(2): 63-65+69(in Chinese)
(罗广祥, 徐斌. 基于Voronoi图的点状要素注记自动配置[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(2): 63-65+69)
- [9] Hu Fengwei, Qiao Junjun, Chen Zhangjian, et al. An improved detecting information model of point annotation labelling in cartography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 132-141(in Chinese)
(胡冯伟, 乔俊军, 陈张健, 等. 改进的地图制图点注记配置探测信息模型[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 132-141)
- [10] Zhang Zhijun. Research on automatic label placement based on rules-engine[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(in Chinese)
(张志军. 基于规则引擎的地图注记自动配置方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011)
- [11] Lu F Y, Deng J Q, Li S Y, et al. A hybrid of differential evolution and genetic algorithm for the multiple geographical feature label placement problem[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(5): Article No.237
- [12] Peng Shanling, Song Ying, Wu Fan. The research of intelligent point-feature cartographic label placement base on ant colony algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 80-81(in Chinese)
(彭珊鸽, 宋鹰, 吴凡. 基于蚁群算法的点状注记智能化配置[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 80-81)
- [13] Wang Li, Zhen Hao. A hybrid algorithm of PSO and GA for automatic placement of point annotation[J]. Computer and Modernization, 2012(10): 30-33+37(in Chinese)
(王立, 郑昊. 粒子群遗传混合算法在点状注记配置中的应用[J]. 计算机与现代化, 2012(10): 30-33+37)
- [14] Li Juan, Zhu Qindong. A genetic taboo search algorithm for point-feature label placement considering the constrain of road network[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 80-85(in Chinese)
(李娟, 朱勤东. 一种顾及道路影响的点要素注记配置遗传禁忌搜索算法[J]. 测绘通报, 2019(2): 80-85)
- [15] Araújo E J, Chaves A A, Lorena L A N. Improving the clustering search heuristic: an application to cartographic labeling[J]. Applied Soft Computing, 2019, 77: 261-273
- [16] Lessani M N, Deng J Q, Guo Z Y. A novel parallel algorithm with map segmentation for multiple geographical feature label placement problem[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(12): Article No.826
- [17] Zhou Xinxin, Sun Zaihong, Wu Changbin, et al. Automatic label placement of point feature: using ant colony algorithm based on group clustering[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(8): 902-908(in Chinese)
(周鑫鑫, 孙在宏, 吴长彬, 等. 地图点要素注记自动配置中聚类分组的蚁群算法应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(8): 902-908)
- [18] Cao Wen, Peng Feilin, Tong Xiaochong, et al. A point-feature label placement algorithm considering spatial distribution and label correlation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(2): 301-311(in Chinese)
(曹闻, 彭斐琳, 童晓冲, 等. 顾及空间分布与注记相关性的点要素注记配置算法[J]. 测绘学报, 2022, 51(2): 301-311)
- [19] Fan Yilun, Lyu Shenglan, Guo Jie, et al. A survey of label placements in visualizations[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2023, 35(8): 1162-1174(in Chinese)
(范毅伦, 吕胜蓝, 郭杰, 等. 可视化中的标签放置方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(8): 1162-1174)
- [20] Kang Jianzi, Zhou Hong. Force-directed layout based knowledge graph visualization method[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2024, 36(8): 1214-1223(in Chinese)
(康健梓, 周虹. 基于力导向布局的知识图谱可视化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2024, 36(8): 1214-1223)
- [21] Zhou Xinxin, Wu Changbin, Sun Zaihong, et al. A 3D annotation optimal placement algorithm for the point features in the small scale geographic scene[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(12): 1476-1484(in Chinese)
(周鑫鑫, 吴长彬, 孙在宏, 等. 小规模地理场景中点要素三维注记优化配置算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(12): 1476-1484)
- [22] She J F, Li X C, Liu J Y, et al. A building label placement method for 3D visualizations based on candidate label evaluation and selection[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 33(10): 2033-2054
- [23] Huang Y D, Kong D H, Zhang Y. Study on dynamic labeling of building in 3D virtual city[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 156-162
- [24] Chen C, Zhang L Q, Ma J T, et al. Adaptive multi-resolution labeling in virtual landscapes[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 949-964
- [25] Gemsa A, Haunert J H, Nöllenburg M. Multirow boundary-labeling algorithms for panorama images[J]. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS), 2015, 1(1): Article No.1
- [26] Hao Tianhao, Lin Zhiyong. Optimal 3D indoor space annotation allocation method[J]. Geospatial Information, 2022, 20(1): 27-31+51(in Chinese)
(郝天浩, 林志勇. 三维室内空间注记优化配置方法[J]. 地理空间信息, 2022, 20(1): 27-31+51)
- [27] Tatzgern M, Kalkofen D, Grasset R, et al. Hedgehog labeling: view management techniques for external labels in 3D space[C] //Proceedings of the IEEE Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 27-32
- [28] Liu Yuangang. Research and improvement of cartographic displacement algorithms based on energy minimization principles[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015(in Chinese)
(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)
- [29] Wei Z W, Ding S, Xu W J, et al. Elastic beam algorithm for generating circular cartograms[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2023, 50(4): 371-384
- [30] 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
- [31] 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(in Chinese)

Chinese)

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):

最新录用