

引文格式:魏智威,杨乃,丁榛,等.地理动画中点要素注记稳定更新的遗传算法[J].测绘通报,2025(8):83-88. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2025.0813.

地理动画中点要素注记稳定更新的遗传算法

魏智威^{1,2},杨 乃³,丁 榛⁴,陈业滨⁵,郭仁忠^{2,5}

(1. 湖南师范大学地理科学学院,湖南 长沙 410006; 2. 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳),广东 深圳 518132; 3. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉 430074; 4. 浙江农林大学环境与资源学院,浙江 杭州 311300; 5. 深圳大学建筑与城市规划学院智慧城市研究院,广东 深圳 518060)

摘要:针对地理动画中点要素的注记更新问题,本文提出了一种基于遗传算法的注记配置优化方法。该方法旨在提高地理动画中注记的时序稳定性,避免帧间注记位置的频繁变化和冲突。通过对注记配置约束条件进行分析,综合考虑了注记压盖、位置优先级、关联性及时序稳定性等多种因素,并提出了一种自适应调整的遗传算法,以优化地理动画注记的配置效果。为验证该方法,开发了相应的地理动画制作工具原型。试验结果表明,该方法能够有效减少地理动画中帧间注记位置的变化,优化了注记的视觉效果,但是也略微增加了算法耗时。

关键词:视频 GIS; 注记配置; 地理可视化; 动态可视化; 遗传算法

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:0494-0911(2025)08-0083-06

Genetic algorithm for stable updating of point feature annotation in geographic animations

WEI Zhiwei^{1,2}, YANG Nai³, DING Su⁴, CHEN Yebin⁵, GUO Renzhong^{2,5}

(1. Hunan Normal University, School of Geographic Sciences, Changsha 410006, China; 2. Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy, Shenzhen 518132, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. College of Environmental and Resource Science, Hangzhou 311300, China; 5. Research Institute for Smart City, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: This study focuses on the issue of point feature label updates in geographic animations and proposes an optimized label placement method based on a genetic algorithm. The method aims to improve the temporal stability of label placements in geographic animations, preventing frequent changes and conflicts in label positions between frames. By analyzing the constraints of label placement, this paper takes into account various factors such as label overlap, positional priority, association, and temporal stability, and introduces an adaptive genetic algorithm to optimize the label placement in geographic animations. Additionally, to validate the proposed method, a prototype tool for geographic animation production was developed. Experimental results demonstrate that the proposed method effectively reduces the variation in label positions between frames in geographic animation, ensuring visual consistency in label placement, though it slightly increases the algorithm's execution time.

Key words: video GIS; label placement; geovisualization; dynamic visualization; genetic algorithm

注记作为地图语言中传递信息的最直观要素,能帮助用户快速定位和识别地理对象,是地图产品的重要组成部分^[1]。为了地图表达的美观和易读性,注记需要依据一定要求进行配置,如应保证注记与注记间无冲突等。依据待注记要素的几何类型,注记可划分为点、线、面 3 类^[2]。其中,无冲突的点要素注记配置最为复杂,已被证明是 NP (non-deterministic polynomial) 困难问题,也是地图学领域

研究的经典问题。

点要素注记配置可视为优化问题,其目标是在有限的空间范围内为待标注对象确定符合特定约束条件的最优位置,相关研究通常涵盖 3 个方面:位置候选模型、优化方法和评价指标。常用的位置候选模型包括固定位置模型、滑块位置模型和自由位置模型等^[3]。其中,典型的固定位置模型包括 2 位置模型、4 位置模型和 8 位置模型等,自由位置模型

收稿日期:2024-12-03

基金项目:国家自然科学基金(42171438);国家重点研发计划(2023YFC3804800)

作者简介:魏智威(1993—),男,博士,主要研究方向为地理可视化、三维重建等。E-mail:2011301130108@whu.edu.cn

则多用于要素密集场景或三维场景,且有时会搭配引导线,以提高注记的指代性。基于选定的候选位置模型,进一步利用物理松弛算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、蚁群算法和遗传算法等智能化方法解决注记配置的优化问题^[4-9]。同时,有研究也从注记质量和算法运行速度方面对上述算法进行了系统评估。结果显示,模拟退火算法速度快,禁忌搜索算法和蚁群算法质量高,而遗传算法则两者兼顾^[10]。为了提高大规模注记配置的效率,部分学者考虑点要素空间分布特征指导注记配置,如采用聚类方法将整体划分为多个子群求解,或结合注记分布密度规划注记配置次序等^[11-13]。为了评价注记配置的质量,相关学者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、引导线交叉数量等^[3]。

但是,上述方法均是针对静态地图设计,难以适应动态地图表达的需要。伴随着空间信息从静态地图描述向多维动态空间信息可视化的转变,出现了大量动画形式的动态地图。如用户在制作徒步路线图时,会通过相机视角的变化多角度展示徒步线路,即地图视图内容会随时间而变化^[14-15]。若逐帧应用静态地图注记配置算法生成动画中各帧的注记位置,会导致注记在时间上的不稳定,如注记会频繁从一个位置突然跳至另一个位置,既影响用户体验也增加了用户识别地理对象的难度。文献[16]系统分析了动态场景中注记配置的规则,指出注记随时序表达的稳定性是提高用户体验的关键。因此,部分研究利用启发式方法依据前后帧切换的冲突区域更新注记结果,从而最大限度地保证了非冲突区域注记的稳定性^[17-20]。但是,上述启发式方法处理冲突区域多是将当前帧作为静态地图处理,忽略了前后帧之间的关联性,这仍然会导致较多注记存在时序上的不稳定性。因此,为提高地理动画中注记表达的稳定性,本文试图利用遗传算法替代现有启发式方法,并在帧间注记更新时充分考虑前后帧之间关联性,既有效考虑与前一帧间注记表达的一致性,也尽量减少未来帧中可能存在的注记冲突,提高地理动画中注记表达的稳定性和可视化效果;同时,开发相应的地理动画制作工具,以验证本文方法的有效性。

1 问题定义

1.1 问题描述

针对地理动画研究其帧间注记更新的新方法,输入的动画序列记为 $\{f_n\}_{n=0}^M$, f_n 为1帧。考虑人眼

视觉暂留时间约为 0.1 s ^[21],帧采样时间亦设定为 0.1 s ,即注记在显示时每 0.1 s 更新一次,而非依据设备刷新率频繁更新。帧 f_n 中存在的点要素集合记为 $\{p_m^n\}_{m=0}^N$ 。另外,考虑目前用户多基于地图服务商提供的电子地图制作地理动画,4位置模型是其中最常用的候选位置模型。本文注记配置也选择4位置模型。4位置的设置如图1所示。依据上述定义,本文问题描述如下:给定动画序列 $\{f_n\}_{n=0}^M$,帧 f_n 对应的点要素集合为 $\{p_m^n\}_{m=0}^N$,基于4位置模型依次确定 f_n 中 $\{p_m^n\}_{m=0}^N$ 对应注记的位置,以获取满足约束条件的配置结果,约束条件定义见下文。需要说明的是,点要素注记配置为NP困难问题,从全局上难以直接获取满足约束条件的最佳注记配置结果,本文试图在已有局部更新技术流程基础上提高其注记配置的时序稳定性。

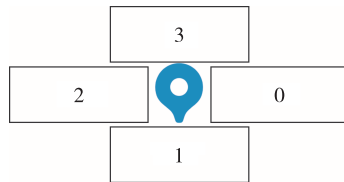


图1 4位置注记候选位置模型

1.2 配置约束

地理动画的注记配置在考虑注记时序稳定性的同时,也须遵循相应的制图原则。本文参考相关研究^[4-7],总结了地理动画中点要素注记配置的表达需求,包括限制性约束和优化性约束,见表1。其中,限制性约束必须满足,优化性约束需尽量满足。由于用户需求往往较为多样且个性化,因此表1中约束在实际应用中可依据需要进行调整或扩展,如部分用户会考虑场景结构特征等配置注记。

表1 地理动画中注记配置的约束整理

约束分类	描述
限制性约束	注记与注记之间不能压盖
	注记与地图符号不能压盖
	尽量将注记放置在优先级高的位置
优化性约束	注记与其对应点要素的视觉关联性应
	大于与其他点要素的关联性

2 注记更新的遗传算法

遗传算法作为一种随机搜索算法,具有较强的全局搜索能力,是一种常用的注记配置方法。文献[10]系统比较了各类注记配置算法的效果,指出遗传算法是一种质量和效率相对均衡的方法。本文

基于遗传算法实现帧间注记更新,包括基因编码、遗传操作和适应度函数。

2.1 基因编码

编码是将帧 f_n 中相关点要素对应的注记配置方案转换为遗传算法种群中的一个个体,每个个体对应一种注记配置方案,基因编码需确定个体基因的数量和基因的取值。

(1) 个体基因数量的确定。个体基因的数量与帧 f_n 中待更新注记的点要素数量有关。本文基于帧 f_n 中存在注记冲突的点要素确定个体基因数量^[9]。但仅处理存在冲突的点要素注记,有时难以获取满足要求的结果,因此需同时将冲突区域一定邻域范围 R 内的点要素纳入考虑。

(2) 基因取值。采用整数向量对基因进行编码^[22]。由于采用 4 位置编码模型,基因取值即为 $\{0,1,2,3\}$,分别对应不同的注记位置。另外,考虑需要尽量保持注记的时序稳定性,即注记不能在邻近时序间移动较大,对基因的取值结合其对应点要素当前的注记位置作如下限制:新的注记位置须与前一帧注记的位置邻近。如图 1 所示,若点要素在前一帧的注记位置为 0,则其对应的基因取值须为 $\{0,1,3\}$,而不能取值为 2。

2.2 遗传操作与自适应概率调整

定义了种群个体基因后,还需要定义种群进化的基因操作,包括选取、交叉和变异操作,相关基因操作在地图注记配置中已有较成熟的研究。本文采用轮盘式选择法进行选取操作,交叉操作则选择点式交叉策略,变异操作选择点式变异策略^[9]。其中,交叉操作和变异操作需设置交叉概率 (P_{cross}) 和变异概率 (P_{mut})。 P_{cross} 大则可以快速收敛到最优解区域,但过高的概率也可能导致过早收敛; P_{cross} 小则搜索过程缓慢。 P_{mut} 大会使遗传算法变为随机搜索,引起算法不稳定;而 P_{mut} 太小又不易产生新的个体。因此,本文通过衡量种群多样性的变化,自适应地调整 P_{cross} 和 P_{mut} ,以一定程度上克服过早收敛和局部最优问题^[22-23]。

种群的多样性可以通过种群个体适应度方差 (D) 的变化衡量,种群个体适应度 (F) 的定义见下文。假设第 n 代种群为 $\{x_m^n\}_{m=0}^N$,种群个体 x_m^n 对应的适应度为 F_m^n ,则第 n 代种群个体适应度方差 D^n 的公式为

$$D^n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^N (F_m^n - \bar{F}^n) \quad (1)$$

式中, \bar{F}^n 为第 n 代种群个体适应度的平均值。前

n 代种群的最大适应度方差记为 D_{max}^n ,则种群个体适应度方差的变化即种群的多样性,可用 $\Delta = D^n/D_{\text{max}}^n$ 衡量, $\Delta \in [0,1]$ 。 Δ 越小,表明种群中个体差异小,遗传算法易陷入局部最优;反之,则表明个体间差异大,遗传算法易变为随机过程。因此, P_{cross} 和 P_{mut} 可依据 Δ 进行调整。当 Δ 较小时,增大 P_{cross} 和 P_{mut} ,避免遗传算法陷入局部最优;当 Δ 较大时,减小 P_{cross} 和 P_{mut} ,避免遗传算法转变为随机过程。

P_{cross} 和 P_{mut} 的自适应调整公式^[22]为

$$P_{\text{cross}} = N_1 - \Delta/2 \quad (2)$$

$$P_{\text{mut}} = N_2 - \Delta/20 \quad (3)$$

式中, N_1 、 N_2 为常数,分别表示用户设置的 P_{cross} 和 P_{mut} 的最大值。

2.3 适应度函数

适应度函数用于计算每个个体相对于环境的适应度 (F),本文为注记配置问题,每个个体对应一种注记配置方案,其适应度即表示注记配置质量,可用满足注记配置约束的程度来衡量。依据上文定义,适应度函数需综合注记的压盖、位置优先级、关联性和时序稳定性等,即适应度函数为各类约束得分的加权和^[9],公式为

$$F = \lambda_1 F_c + \lambda_2 F_l + \lambda_3 F_p + \lambda_4 F_r \quad (4)$$

式中, F_c 、 F_l 、 F_p 和 F_r 分别表示注记压盖、位置优先级、关联性和时序稳定性的得分; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 为各约束得分的权重。 F_c 、 F_l 和 F_p 在现有研究中已有明确定义,本文保持与已有研究一致^[8]。 F_r 则是以往研究存在区别的地方,即在现有研究基础上还强调保证注记的时序稳定,即注记位置在前后帧之间应尽量保持一致。一方面,更新后的注记配置相比前一帧注记配置变化应尽可能小,该变化可用前后帧注记位置变化的数量 N_{label} 确定。另一方面,更新后的注记配置也应尽量保证后续帧的注记配置变化尽可能小。考虑注记配置是由于注记间或注记与地图符号间存在压盖而需要调整,若更新后的注记配置能尽量减少后续帧中注记间或注记与地图符号间的冲突,则可以一定程度上减小后续帧注记配置的变化。因此,本文将当前帧后续的 N_{frame} 帧中可能存在的注记间或注记与符号间冲突也纳入考虑。依据当前帧更新的注记配置结果,可计算后续第 n 帧中存在的注记间或注记与符号间冲突数量,记为 N_{conflict}^n 。综上所述,综合考虑前后帧可能的注记位置变化, F_r 定义为

$$F_r = N_{\text{label}} + \sum_{n=0}^{N_{\text{frame}}} N_{\text{conflict}}^n \cdot \alpha_n \quad (5)$$

式中, α_n 为权重。考虑若距离当前帧越远,即式(5)

中 n 取值越大,则当前帧注记配置变化引起的后续帧注记配置变化可能性也越小,因此 α_n 的取值伴随 n 的增大而衰减,定义为 $\alpha_n = 1 - n/N_{\text{frame}}$ 。另外,需确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的取值。考虑注记压盖为限制性约束,即必须满足,且时序稳定性是动画序列注记更新中较为重要的因素,因此 $\lambda_1 = 2\lambda_2 \gg \lambda_3 = \lambda_4$ 。

2.4 地理动画序列注记更新流程

给定地理动画序列 $\{f_n\}_{n=0}^M$, 需要逐帧生成其注记配置。当为第 1 帧时,该帧没有前序帧,其注记配置需尽量减少后续帧的注记变化。因此在对第 1 帧进行注记配置时,将当前帧中的所有点要素均作为基因参与遗传算法计算。另外,随着动画序列注记配置的逐渐更新,若后续帧数量小于 N_{frame} ,则 N_{frame} 应等于后续帧的数量。本文地理动画序列注记更新算法流程如下。

算法 1:地理动画序列注记更新流程

输入:地理动画序列 $\{f_n\}_{n=0}^M$, 遗传算法中构建基因考虑的邻域范围 R , 式(2)和式(3)中遗传算法的交叉和变异概率 N_1 和 N_2 , 式(4)中各部分约束条件的权重 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 , 考虑的后续帧数量 N_{frame} ;

输出:各帧中点要素注记配置结果;

初始化:当前处理的帧排序 $n \leftarrow 0$, 各帧中点要素的注记位置均选择最佳位置配置,即取值图 1 中点位 0;

Do

If $(M-n) < N_{\text{frame}}$ **Then** $N'_{\text{frame}} = M-n$

Else Then $N'_{\text{frame}} = N_{\text{frame}}$

If $n = 0$ **Then** 将全体注记点要素作为基因执行遗传算法获取当前帧注记算法配置结果

Else Then 将当前帧中存在注记冲突的点要素及其关联的点要素作为基因执行遗传算法获取注记算法配置结果

Return 各帧中点要素注记配置结果

3 试验

3.1 试验说明

3.1.1 系统说明

实现地理动画中注记更新的前提是需要有制作地理动画的工具。文献[14]系统分析了结合相机视角变换制作地理动画的特点和基础操作,包括放大、缩小、平移、俯仰、环绕、旋转、追踪、放大+俯仰、平移+俯仰、旋转+俯仰 10 种操作。因此,本文参考开发了结合相机视角变换制作地理动画的工具原型,界面如图 2 所示。图 2(a)为可选的地理动画操作,图 2(b)为地图视图,用户点击对应操作后可通过图 2(c)设置操作参数。用户点击放大操作,

用户可设置放大中心和持续时间等。设置完参数的地理动画操作可添加到当前的动画时间线中(如图 2(d)所示),用户可结合多个动画操作制作持续时间更长且视角更丰富的地理动画。每一个地理动画操作形成的动画片段中,调用注记更新算法生成各帧的注记配置。

3.1.2 试验数据

以 MapBox 公司提供的三维地理场景为底图,选取 2022 年 10 月 10 日某地区船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)获取的船只轨迹数据(已脱敏)为试验数据,船舶数量为 127。

3.1.3 评价指标

依据上文配置约束评价注记配置结果,评价指标包括:①注记之间或注记与符号之间的平均压盖个数 N_{r-r} ;②邻近帧之间注记位置变化的平均数 N_{label} ;③邻近帧之间注记位置大幅变化的平均数 $N_{\text{lar-label}}$,即注记位置更新至其与前一帧位置非邻近的位置,如由图 1 中的点位 0 更新至点位 2;④注记位于最佳位置的平均比例 R_{label} ,即注记位于图 1 中点位 0 的平均比例;⑤平均每一帧的算法耗时 t 。

3.1.4 试验环境

基于 MapBox JS 实现本文方法,试验平台为一台 CPU 为 AMD Ryzen 7-7840HS w/Radeon 780 M Graphics @ 3.80 GHz、内存为 16 GB、操作系统为 Windows 11(64 位)的计算机。

3.1.5 试验细节与参数设置

考虑人眼视觉暂留时长以 0.1 s 为帧采样频率,且放大、缩小等地理动画操作涉及点要素选取(不是本文注记更新研究的内容),因此分别基于旋转(Data_Roll)和追踪(Data_Track)两种地理动画操作制作了 2 s(20 帧)和 5 s(50 帧)的地理动画片段[23,25]。动画中各帧注记配置分别采用 3 种方法生成:①注记均选择最佳点位,且帧间注记不更新(Non_Label);②不考虑注记时序稳定性的遗传算法(Gen_Label);③考虑注记时序稳定性的遗传算法(StableGen_Label)。

考虑注记时序稳定性的遗传算法,参数设置如下:遗传算法中构建基因考虑的邻域范围 R ,取值为场景中字符屏幕长度的平均值,式(2)和式(3)中遗传算法的交叉和变异概率分别为 $N_1 = 0.9$ 和 $N_2 = 0.1$,式(4)中各部分约束条件权重为 $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.25$, $\lambda_3 = 0.01$, $\lambda_4 = 0.01$,考虑的后续帧数量 $N_{\text{frame}} = 10$ 。不考虑时序稳定性的遗传算法设置 $\lambda_2 = 0$;同时,基因取值为 $\{0, 1, 2, 3\}$,而非依据前一帧注记位置取值。

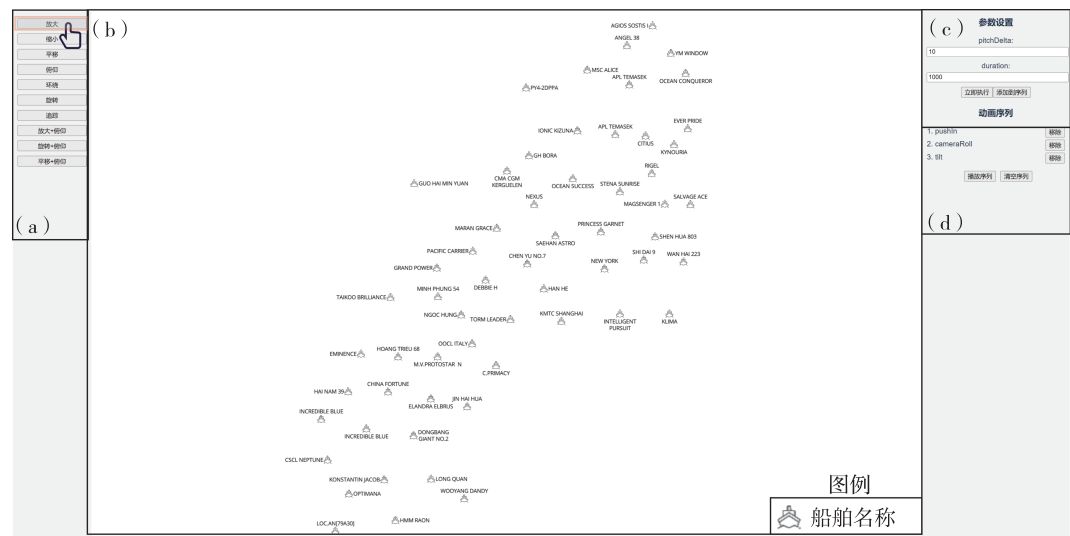


图 2 地理动画制作工具原型界面

3.2 结果分析

3.2.1 定量分析

对比分析两段地理动画 (Data_Roll 和 Data_Track) 中的 3 种方法 (Non_Label、Gen_Label 和 StableGen_Label),统计结果见表 2。可以看出,若注记位置未进行配置和更新,Data_Roll 片段中每一帧平均存在 18.7 个注记冲突,Data_Track 片段中每一帧平均存在 19.2 个注记冲突;而利用遗传算法对注记位置进行配置和更新后,每一帧均不存在冲突。可见,遗传算法能有效避免注记冲突。但利用遗传算法逐帧更新注记位置也会导致帧间注记位置发生变化。Gen_Label 方法生成的 Data_Roll 片段中平均每帧间注记位置变化数量为 2.6,且平均每帧间大幅注记位置变化数量为 0.6;Data_Track 片段中平均每帧间注记位置变化数量则为 1.3,且平均每帧间大幅注记位置变化数量为 0.3。相比 Gen_Label 方法,若在遗传算法中考虑注记的时序稳定性,Data_Roll 片段中平均每帧间注记位置变化数量减小 0.6,且平均每帧间大幅注记位置变化的数量为 0;Data_Track 片段

中平均每帧间注记位置变化数量则减小 0.4,且平均每帧间大幅注记位置变化数量也为 0。上述结果表明,相比现有不考虑邻近时序稳定性的帧间注记更新方法,本文方法能有效减少帧间注记位置的变化,且能有效避免邻近帧间大幅注记位置变化。但这也导致降低位于最佳点位注记的比例,相比 Gen_Label 方法,本文方法生成的 Data_Roll 片段中位于最佳点位注记的比例平均会降低 23.5%,Data_Track 片段中位于最佳点位注记的比例平均则会降低 20.3%;同时,还会略微增加算法耗时,相比 Gen_Label 方法,本文方法生成 Data_Roll 片段平均每帧算法耗时会增加 11.9 ms,Data_Track 片段平均每帧算法耗时会增加 5.1 ms。

综上所述,本文方法能有效避免地理动画中注记冲突,相比已有不考虑邻近时序稳定性的帧间注记更新方法,能有效减少地理动画中帧间注记位置的变化,且能有效避免帧间大幅注记位置变化;但是也会降低位于最佳点位的注记比率且略微增加算法耗时。

表 2 注记配置结果评价

地理动画	方法	N_{t-r}	N_{label}	$N_{lar-label}$	$R_{label}/(\%)$	t/ms
Data_Roll	Non_Label	18.7	0	0	100	—
	Gen_Label	0	2.6	0.6	58.2	243.1
	StableGen_Label	0	2.0	0	34.7	255.0
Data_Track	Non_Label	19.2	0	0	100	—
	Gen_Label	0	1.3	0.3	52.9	242.1
	StableGen_Label	0	0.9	0	32.6	247.2

3.2.2 定性分析

图 3 展示了 Data_Track 动画片段第 1 帧 3 种方

法 (Non_Label、Gen_Label 和 StableGen_Label) 的注记配置结果。对比图 3(a)、(b) 和 (c) 可知,若不进

行注记配置,注记会存在较多压盖,如图3(a)的区域A、B,而利用遗传算法对注记进行配置后对应区域则无压盖,如图3(b)和(c)所示。对比图3(b)和(c)可知,若不考虑帧间注记更新的时序稳定性,注记会更倾向于配置在最佳点位,但也会导致局部注

记密集,如图3(b)的区域C和D,这会导致随着相机轨迹的移动,后续帧中更易出现注记压盖,即需更新注记位置;而图3(c)对应区域注记则分布相对分散,能在一定程度上增强帧间注记更新的时序稳定性,但也会导致部分注记不在最佳点位。

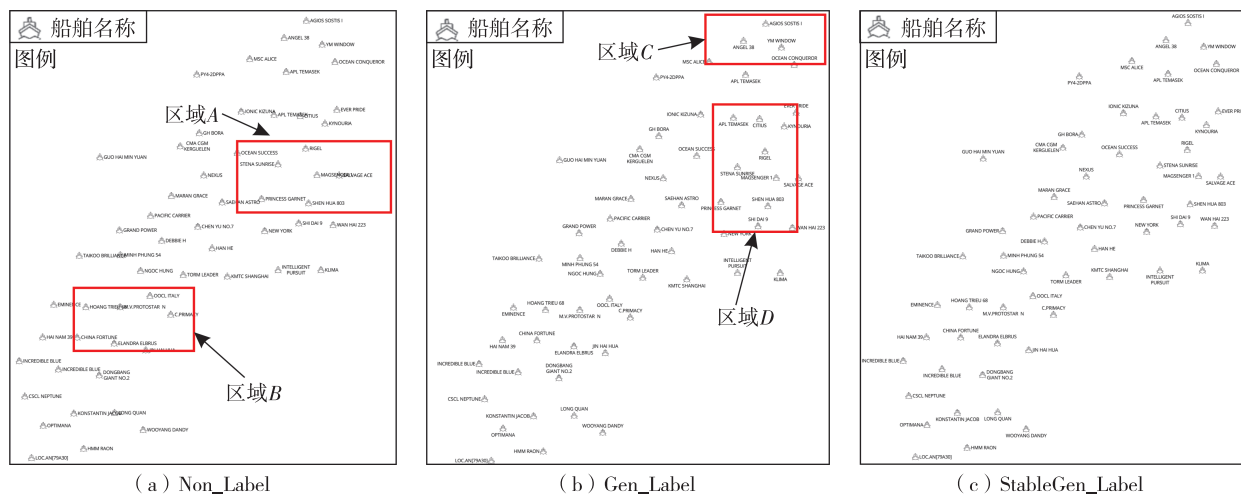


图3 3种方法的单帧注记配置结果

4 结论

本文提出了一种基于遗传算法的地理动画点要素注记更新方法,旨在提高地理动画中注记配置的时序稳定性,避免动画中帧间注记位置的频繁跳跃。通过试验验证,该方法在保证注记配置质量的同时,有效减少了注记在相邻帧之间的显著位置变化。与传统的注记配置方法相比,本文方法虽然降低了注记位于最佳位置的比例,但也有效增强了注记的时序稳定性,改善了用户的视觉体验。未来的研究将考虑结合更复杂的场景结构特征或最新的强化学习方法等,进一步优化注记配置效果。

参考文献:

- [1] 何宗宜,宋鹰,李连营. 地图学[M]. 武汉: 武汉大学出版社,2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] RIBEIRO G M, LORENA L A N. Lagrangean relaxation with clusters for point-feature cartographic label placement problems [J]. Computers & Operations Research,2008,35(7):2129-2140.
- [8] 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.
- [9] LU Fuyu, DENG Jiqiu, LI Shiyu, 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):237.
- [10] YAMAMOTO M, CAMARA G, LORENA L A N. Tabu search heuristic for point-feature cartographic label placement[J]. GeoInformatica,2002,6(1):77-90.
- [11] 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.
- [12] LESSANI M N, DENG Jiqiu, GUO Zhiyong. A novel parallel algorithm with map segmentation for multiple geographical feature label placement problem[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(12):826.
- [13] 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.

(下转第94页)

- [3] BRAKATSOULAS S, PFOSE D, SALAS R, et al. On map-matching vehicle tracking data[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases. Trondheim: [s. n.], 2005: 853-864.
- [4] BIERLAIRE M, CHEN Jingmin, NEWMAN J. A probabilistic map matching method for smartphone GPS data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 26: 78-98.
- [5] 黎琮莹, 周玉松. 基于雷达数据和朴素贝叶斯模型的道路养护区车辆轨迹预测[J]. 公路, 2023, 68(11): 338-341.
- [6] 刘洋. 监控视频与二维地图的集成研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [7] JIANG Yuande, ZHU Bing, YANG Shun, et al. Vehicle trajectory prediction considering driver uncertainty and vehicle dynamics based on dynamic Bayesian network[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(2): 689-703.
- [8] 张兴国. 地理场景协同的多摄像机目标跟踪研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [9] 李广耀, 黄正锋, 楼乐依. 基于贝叶斯网络的稀疏出租车 GPS 轨迹路径还原方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, 34(2): 17-24.
- [10] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 城市道路交通规划设计规范: GB 50220—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [11] 赵舒扬, 赵东辉, 喻华, 等. 大数据背景下智慧城市交通应急平台建设[J]. 测绘通报, 2019(S1): 140-142.
- [12] 叶焯星, 杨飞. 基于介数中心性的交通拥堵指数计算[J]. 测绘通报, 2021(5): 86-90.
- [13] 中华人民共和国公安部. 道路交通拥堵度评价方法: GA/T 115—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [14] 李小龙, 张昀. 道路信息提取方法综述[J]. 测绘通报, 2020(6): 22-27.
- [15] 杨济瑞. 基于车联网的道路车辆密度分布及预测技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [16] LIU Chang, LU Dagang. Probabilistic seismic hazard analysis for China based on Bayesian network[J]. Seismological Research Letters, 2024, 95(1): 50-63.
- [17] MENG Dechao, LI Liang, LIU Xuejing, et al. Parsing-based view-aware embedding network for vehicle re-identification[C]//Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020: 7101-7110.

(责任编辑: 纪银晓)

(上接第 88 页)

- [14] LI Wenchao, WANG Zhan, WANG Yun, et al. GeoCamera: telling stories in geographic visualizations with camera movements[C]//Proceedings of 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hamburg: ACM Press, 2023: 1-15.
- [15] BOBÁK P, LADISLAV Č, MARTIN Č. Temporally stable boundary labeling for interactive and non-interactive dynamic scenes[J]. Computers & Graphics, 2020, 91: 265-278.
- [16] GEMSA A, NIEDERMANN B, NÖLLENBURG M. A unified model and algorithms for temporal map labeling[J]. Algorithmica, 2020, 82(10): 2709-2736.
- [17] CHEN Chen, ZHANG Liqiang, MA Jingtao, et al. Adaptive multi-resolution labeling in virtual landscapes[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 949-964.
- [18] GEMSA A, HAUNERT J, NÖLLENBURG M. Multirow boundary labeling algorithms for panorama images[J]. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS), 2015, 1(1): 1-30.
- [19] 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.
- [20] RYAN A, LEÓN VILLALOBOS J M, RODRÍGUEZ LOMBARDO M. Mapeo[M]//Evaluating Participatory Mapping Software. Cham: Springer International Publishing, 2023: 41-70.
- [21] The information available in brief visual presentations[J]. Psychological Monographs: General and Applied, 1960, 74(11): 1-29.
- [22] 孙雅庚, 郭庆胜, 刘远刚, 等. 顾及格式塔原则的建筑物群移位实数编码遗传算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 269-273.
- [23] 魏智威, 杨乃, 许文嘉, 等. 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[J/OL]. 计算机辅助设计与图形学学报: 1-11 [2025-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2925.tp.20250214.1455.004.html>.

(责任编辑: 纪银晓)