引文格式：张莹,孙聪,程华明,等. 面向跑图的道路图形检索方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 18-22. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.004

面向跑图的道路图形检索方法研究

张　莹[1]，孙　聪[2]，程华明[2]，付仲良[1*]
（1. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079；2. 武汉市生态环境设计研究院有限公司，湖北 武汉 430000）

摘　要：针对跑图任务中对道路图形的高效检索需求，提出了一种道路图形检索方法，首先以图形局部形状特征为约束条件，在路网中逐一搜索图形各边，筛选得到与输入图形形状相匹配的道路集合，即检索结果候选集；然后建立相似度指标对候选集中的候选路径进行相似度排序；最后输出最符合用户需求的检索结果。实验证明，该方法成功实现了跑图任务中道路图形检索的自动化，为用户提供了便捷、个性化的跑图体验。

关键词：跑图；路网；图形检索；几何特征；相似度判断
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0018-05

Retrieval Method for Road Graph Oriented Towards Running Graph

ZHANG Ying[1], SUN Cong[2], CHENG Huaming[2], FU Zhongliang[1]
(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Wuhan Institute of Ecological Environment Design Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at the efficient retrieval of road graphs in the running graph tasks, we proposed a road graph retrieval method. Taking the local shape features of graph as constraints, we performed a one-by-one search on each road segment in the road network to screen out a set of roads that matched the input shape, thus obtaining a candidate set of retrieval results at first. Then, we established similarity metrics, and sorted the candidate paths. Finally, we outputted the optimal retrieval result that best met the user's requirements. Experimental result proves that the proposed method successfully realizes the automation of road graph retrieval in running graph, providing users with a convenient and personalized running graph experience.

Key words: running graph, road network, graph retrieval, geometric feature, similarity evaluation

随着经济的发展和生活节奏的加快，全民运动的重要性日益凸显，而增加运动趣味性是提高国民运动积极性的有效手段[1]。跑图亦称GNSS艺术，即通过位置跟踪的形式，以GNSS工具为画笔，地图为画布，用户为画家，在任意位置挥洒想象创作图案。目前消费电子设备集成GNSS的技术已十分成熟，在集成跟踪硬件的支持下，国外跑步与自行车爱好者开始在类似STRVA的运动平台分享自己的跑图成果，国内也相继出现了华为运动、创意跑步等应用软件。实现跑图目标的关键是在路网中准确寻找到用户需求的道路图形，而目前主要采用手动选择或非智能化的方法，限制了跑图的发展。因此，用户对在路网中自动检索自定义图形提出了新需求。虽然已有一些研究致力于解决该问题，但迄今为止的方法[2-5]仍存在一些局限性。针对自动化道路图形检索问题，首先以图形局部形状特征为约束，在路网上对图形各边进行逐边相似性比较搜索，得到与输入图形形状相似的候选集；然后根据图形的整体相似度，比较候选集中的图形与输入图形，得到最佳检索结果，以满足用户预期的路线规划需求。与现有方法相比，该方法具有普适性强、检索效率和自动化程度高的特点，不仅适用于GNSS艺术创作，还能应用于图形数据库的按形状检索等。

1　道路图形检索逻辑模型建立

该方法的目标是根据用户提供的目标图形，在复杂的城市路网中自动检索与之相匹配的道路组合，从而实现跑图路线的自动规划。待检索的图形为无初始大小、方向，无位置信息和语义信息的矢量折线图形，分为独立图形和组合图形两种，独立图形包括连

第一作者简介：张莹（1998—），硕士，研究方向为地理信息分析与服务，E-mail：1347758562@qq.com。
通信作者：付仲良（1965—），博士，教授，研究方向为空间数据管理与更新、遥感图像处理与分析、地图扫描影像识别等，E-mail：fuzl@whu.edu.cn。

通图形和非连通图形；组合图形的各子图形不仅具有各自的形状特征，还存在固定的相对位置关系。检索的道路范围为仅包含各道路节点坐标信息和相应连接关系的路网结构。本文设计了图形局部特征约束的逐边搜索算法，以提取与输入图形相似的道路图形。采用基于启发函数的检索方法，以图形长度、角度、拓扑关系为搜索的约束条件，检索得到全部符合约束的相似图形候选集，再对其进行整体相似度度排序，最后确定最佳检索结果。若输入图形为组合图形，还需根据已检索的图形确定下一个图形的搜索范围、方向和拓扑关系，直至组合图形全部搜索完成为止。

2　面向跑图的道路图形检索方法

2.1　图形局部形状特征约束的逐边搜索算法

该算法可从路网中提取与输入图形相似的道路集合，具体步骤为：①在输入图形中将任意一个节点作为搜索起始点，将与起始点连接的一条边作为起始边，长度可由其在输入图形总边长的占比和规划路径长度确定，实际应用中可优先选择距离用户位置最近的节点作为起始点，将起始边长度占输入图形长度的比例作为道路图形整体放缩比例，将该边较输入图形对应边的旋转角度作为道路图形整体旋转角度，若没有这样的边，则可选择下一个节点作为起始点；②依次将输入图形上一条边的搜索路径终点作为下一条边的起始点、将该输入图形边旋转后对应的方位角作为输入边的方向，缩放后的长度作为输入边的长度，根据道路图的连接关系，不断向外扩展节点，并记录到该节点的路径，本文通过建立启发函数对搜索过程进行约束[6-7]，先判断节点连接数以提高检索效率；③在搜索完全部连接边后，判断构成图形的全部边是否均已被检索，若是则按照顺序连接满足条件的道路组合构成道路图形，并将其存入检索候选集，若不是则根据未检索和已检索部分的相对位置和拓扑关系确定搜索起始点和检索范围，再次进行逐边检索，直至所有边检索完成；④重新选择道路起始点，以确保全部路网道路节点均作为起始点进行检索，从而找到路网中存在的全部相似图形。

节点连接数即某节点连接道路节点的路段数量[8-9]。搜索过程中若输入图形的节点连接数大于对应路网节点的连接数，则不在该节点进行启发式搜索；反之则在以下两个启发式约束下进行启发式搜索。

1）邻边边长比约束。扩展节点时，优先扩展预计搜索结果总长度最小的节点，同时剔除当前搜索路径总长度明显超出邻边边长约束范围的节点。邻边边长比约束需考虑实际付出和预计付出的总代价，计算公式为：

$$g_l(i)=\begin{cases} l_i^{'}+g_l(i-1), & l_i^{'}<(l_i\pm\sigma l_{i-1})\dfrac{l_{i-1}}{l_{i-1}^{'}} \\ +\infty, & l_i^{'}>(l_i\pm\sigma l_{i-1})\dfrac{l_{i-1}}{l_{i-1}^{'}} \end{cases} \tag{1}$$

式中，$g_l(i)$ 为当前节点 V_i 搜索路径的累计长度；l_i、$l_i^{'}$ 分别为原图形、道路图形从节点 V_{i-1} 到 V_i 的长度；$l_{i-1}^{'}$ 为 l_{i-1} 在路网中的对应路径；σ 为邻边边长比约束阈值。

V_i 到搜索终点的预计付出代价 $h_l(i)$ 由 V_i 到输入边终点 P_{end} 的欧氏距离来估计。

2）邻接线角度差约束。邻接线角度差无需考虑实际付出代价，只需在预计代价中对邻接节点的方向差值进行约束，即不能超出方向约束范围，且方向偏差越小代价越小。方向代价函数的计算公式为：

$$h_a(i)=\begin{cases} \dfrac{|\Delta\alpha_i|}{\alpha_c}, & |\Delta\alpha_i|\leqslant\alpha_c \\ +\infty, & |\Delta\alpha_i|>\alpha_c \end{cases} \tag{2}$$

式中，$\Delta\alpha_i$ 为搜索起始点到节点 i 的方向与输入边方向的差值；α_c 为设置的邻接线角度差约束范围。

利用方向和长度的特征约束构造的启发函数为：

$$\begin{cases} f(x)=g(x)+h(x) \\ g(x)=g_l(x) \\ h(x)=u\times h_a(x)+h_l(x) \end{cases} \tag{3}$$

u 可将节点的方向差异加权转换为距离差异。在启发函数 $f(x)$ 的约束下，在路网中进行搜索。

考虑到实际路网结构的复杂性，输入图形的边与其在路网中的边并非1∶1的对应关系[10]，因此搜索过程中需通过直线与折线相似度判断方法对搜索的道路集进行初判断。从某一节点开始执行深度优先搜索，访问每个道路节点，将其加入折线，并继续对新加入的节点进行搜索，直至折线总长度满足边长比约束；再以点到直线平均距离、点到直线最大距离为参数，判断搜索折线与输入图形对应直线之间的相似度[11]，相似则可进入启发函数计算，否则为非直线，清空暂存集合并返回上一节点，继续遍历其他连接线；当线段集合满足全部局部形状特征约束后，进行下一边的

检索，直至全部连接边都检索完成。

1）点到直线平均距离。如图1所示，假设AP、PQ、QR、RM、MV、VN、NB共同构成一条折线，构造一条线段M，即折线最小外接矩形的长对称轴与矩形边界的交点连线；计算折线各节点到M的直线距离绝对值的平均值，再与M的长度进行比较并归一化。

$$\mathrm{ADFPL}=1-\frac{\sum_{0}^{n-1}D_i}{n\times l_{\mathrm{M}}} \tag{4}$$

式中，n为集合内线段数量；x_i、y_i为暂存集合中$i+1$条线段的起点坐标；D_i为(x_i,y_i)到M距离的绝对值。

2）点到直线最大距离（MDFPL）。计算折线各节点到M直线距离的最大绝对值，并与M的长度进行比较并归一化，得到结果可作为相似度评价依据。

若上述两个指标同时大于设定的参数阈值，则判断暂存集合相似于直线，进入邻接线角度差约束条件筛选。根据专业经验，设定阈值需满足：0.9≤ADFPL≤1，0.8≤MDFPL≤1。

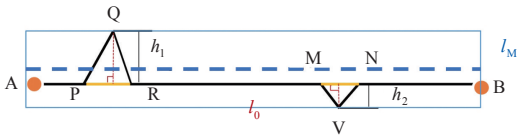


图1 散点到对称线距离示例

2.2 整体相似度判断

通过路网检索得到与输入图形基本相似的检索结果候选集，但由于局部约束具有松弛性，将导致误差积累，各结果与输入图形的相似程度不尽相同，因此确立相似度指标，以寻找最佳相似结果。

1）外接矩形长宽比评价因子。计算输入图形和检索结果的外接矩形纵横比，比较纵横比的差值并归一化，即

$$\mathrm{ARBR}=\max\left(1-\frac{\left|\mathrm{ARER}_i-\mathrm{ARER}_s\right|}{\mathrm{ARER}_i},0\right) \tag{5}$$

式中，ARER_i、ARER_s分别为输入图形、检索结果的外接矩形长宽比。

2）边长差评价因子。由检索结果可知输入图形与检索结果之间的缩放比例，将检索结果放缩至输入图形大小，对各输入图形边与搜索结果对应边集合在X轴与Y轴进行投影，计算各输入图形节点与搜索结果对应节点的曼哈顿距离之差，累加并做归一化处理。

$$\mathrm{TLD}=\max\left(1-\frac{\left|D_{\mathrm{input}}-D_{\mathrm{search}}\right|}{D_{\mathrm{input}}},0\right) \tag{6}$$

式中，D_{input}、D_{search}分别为输入图形和搜索结果各边曼哈顿距离之和。

3）黎曼和评价因子。由于图形具有空间属性，构建黎曼和[12]评价因子MLD，以输入边为横轴，以边的长度为求解区间，对其进行等分，检索路径用函数表示。计算每个以部分区间为宽，以部分区间起始点对应函数值为高构成的矩形面积，并相加全部解，得到输入边与对应检索道路序列之间的黎曼和，最后求各边总合并归一化，从而描述路径与输入边的整体形状差异。

综合上述3个因子建立相似度评价指标，即

$$S_g=t_1\times\mathrm{MLD}+t_2\times\mathrm{TLD}+t_3\times\mathrm{ARBR} \tag{7}$$

式中，t_1、t_2、t_3分别为MLD、TLD、ARBR的权值，满足$t_1+t_2+t_3=1$，本文取$t_1=t_2=t_3=1/3$。

本文根据该相似度指标，由高到低对检索结果候选集进行排序，从而快速输出最优匹配结果。

2.3 组合图形在路网中的搜索

在某些场景下，需要得到多个图形的组合，如LOVE由4个字母组合而成，除了要满足子图本身检索结果的合理性，还要考虑到多个图形之间的方向、相对位置和拓扑关系。根据第一个子图的方向以及与第二个子图之间的拓扑、相对位置和相对长度关系来约束第二个子图的检索区域。

1）确定检索位置与拓扑关系。首先以第一个子图外接矩形的方向和大小为基准，确定整体图形的旋转和缩放比例；再以第一个子图的缩放比例确定第二个子图的缩放比例和旋转角度；最后通过第一个子图的外接矩形以及与第二个子图的相对位置关系约束检索区域，在该区域内进行检索。

2）以第二个子图为输入图形，在该区域内进行遍历。第二个子图的结果需要满足：外接矩形沿长边的方位角与第一个子图的差值小于阈值（本文设置为45°）；且总长度与第一个子图的差值小于阈值（本文设置为$0.3\,L_{G1}$）。

检索得到第二个子图后，需验证其与第一个子图是否满足输入图形组合中对应的拓扑关系，以确保各子图的相对位置关系。本文采用的拓扑关系模型为四交模型[13-14]。针对组合图形的搜索方法，不仅能确保

检索结果各子图形状与输入图形对应子图相似，还能保证各子图的相对位置、方向和拓扑关系与输入图形保持一致，从而有效避免匹配错误。该方法设置的约束条件适中，实现了检索成功率和准确性的平衡，确保搜索过程的高效和可靠。

3　实验结果与分析

3.1　实验数据

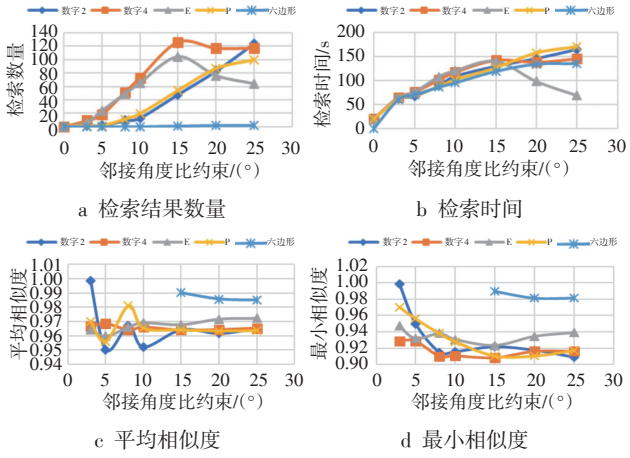
1）路网数据。本文随机选择深圳（48 127 条）、武汉（19 629 条）、北京（9 607 条）、上海（8 759 条）等城市的部分街道网络作为实验数据，范围面积均为 100 km^2。

2）输入图形。考虑到实际应用场景，实验中的输入图形选择了数字（1~8）、英文字母（C、F、H、Y、Z）和几何图形（三角形、四边形、六边形、心形）。

3.2　实验结果分析

3.2.1　不同参数对搜索结果的影响

对局部特征描述算子中的邻边边长比、邻接线角度差在搜索过程中的约束阈值进行探索，以寻找综合考虑检索效率、检索准确性与检索成功率的合适阈值。选取北京作为实验路网，数字 2、4，字母 E、P，图形六边形作为输入图形，邻边边长比约束比例、距离约束容差均设置为 0.2，无单个搜索限制，实验结果见图 2，可以看出，检索结果数量和时间与邻接线角度差约束阈值存在正相关，当约束阈值超过 15° 后，二者的增长趋于平缓；在其他约束条件不变的情况下，约束阈值处于 0~10° 区间时，平均相似度受其影响较明显，随着约束阈值的增加，平均相似度、最小相似度均呈明显的下降趋势，这主要是由于邻接线角度差约束的放宽导致搜索范围扩大，引入了更多相似度较低的结果，从而拉低了平均相似度，约束阈值超过 10° 后，则呈现较稳定的变化趋势，其原因在于道路间角度主要集中在（90°± μ）的范围内，当阈值超过该范围后，约束对检索结果的影响逐渐减弱，而长度和拓扑约束则成为主导因素。值得注意的是，对于六边形等非直角构成的图形，邻接线角度差约束的影响尤为显著，当约束阈值在 15° 以内时，六边形的搜索结果非常有限，但随着阈值的增加，搜索结果的数量逐渐增加，进一步验证了邻接线角度差约束在特定情况下对检索结果的重要影响。综上所述，实验选择 15° 作为检索过程中的邻接线角度差约束阈值。

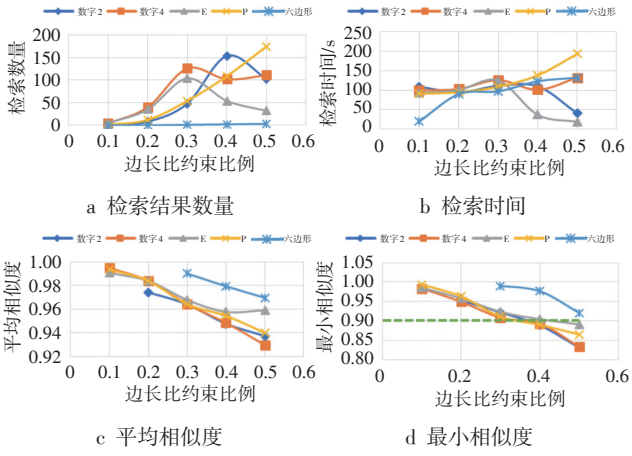


a 检索结果数量　b 检索时间

c 平均相似度　d 最小相似度

图 2　各参数随邻接线角度差约束的变化趋势

确定邻接线角度差约束阈值后，实验对最佳邻边边长比进行探索，距离约束容差设置为 0.2，无单个搜索限制，结果见图 3，可以看出，当邻边边长比约束阈值为 0.1 时，系统开始检索到图形，而约束阈值为 0.3 时才能有效搜索更复杂的六边形，说明其对图形检索的成功率具有显著影响；邻边边长比约束阈值对检索时间影响较小，但对结果准确性影响较大；与平均相似度和最小相似度之间存在明显的线性负相关关系，在 0.3~0.4 区间内部分相似度已低于 0.9，可能会对检索结果的准确性产生不利影响。综合考虑检索成功率和结果准确性，实验选择 0.3 作为邻边边长比约束阈值。



a 检索结果数量　b 检索时间

c 平均相似度　d 最小相似度

图 3　各参数随邻边边长比约束的变化趋势

3.2.2　实验结果的准确性与普适性分析

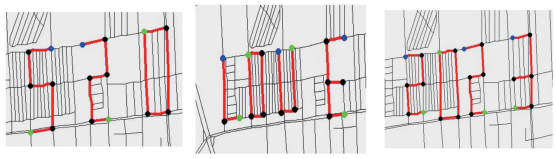
实验数据选取全部路网作为实验路网，全部图形作为输入图形，邻接线角度差约束阈值、邻边边长比约束阈值、距离约束容差和单个搜索限制分别设置为 15°、0.3、0.2 和 10。图形搜索部分实验结果见图 4，各图耗时分别为 4 s、2 s、2 s；组合图形搜索结果见图 5，各图耗时分别为 637 s、454 s、537 s。结果表明，该方法能成功搜索与输入图形形状相似的结果，

证明了其在实际应用中的可行性和准确性。各路网所有检索结果的最低相似度以及检索消耗的平均时间见表1。根据专家打分法统计分析结果，当检索结果相似度大于0.6时，可认为相似于原始输入图形，搜索成功。由实验结果可知，无论是单个图形还是组合图形，在各实验路网中的搜索成功率均能达到100%，说明本文算法具有普适性，能灵活应对不同路网的检索需求。



a 心 b Q c 6

图4 图形检索结果



a 520 b LOVE c 2023

图5 组合图形检索结果

表1 检索结果统计

路网	单个图形成功率/%	平均消耗时间/s	组合图形成功率/%	平均消耗时间/s	最低相似度
北京	100	34.6	100	432.6	0.956
深圳	100	107.5	100	268.0	0.943
上海	100	56.6	100	569.3	0.964
武汉	100	13.4	100	479.0	0.957

4 结 语

针对线条图形在路网中的检索提取问题，提出了一种基于图形特征的逐边搜索算法。该算法通过提取图形的关键图形描述算子，对路网中的道路组合进行基于启发函数约束的搜索，旨在寻找能准确表达输入图形特征的道路组合。在检索过程中，算法不仅考虑了各图形本身的合理性，还兼顾了多个图形之间的方向性和相对位置约束。为综合评估检索到的道路组合与输入图形的相似度，引入了外接矩形长宽比、边长差和黎曼和3种评价因子，建立相似度指标，对检索结果进行择优排序，得到最佳检索结果，从而有效解决了线条图形在路网中的检索提取问题。本文综合运用基于图形特征的逐边搜索算法和整体相似度评价全面考量了图形局部相似性和整体相似性，从而提高了搜索的准确性和效率，为图形搜索和识别领域提供了新的思路和方法[15]。

本文解决了自动化创建GNSS艺术路径的需求问题，使更广泛的公众能参与GNSS艺术创作；为地理空间数据查询检索领域提供了基于图形形状特征的检索新方法，丰富了数据查询手段。然而，由于路网尤其是城市道路网多为格网状，道路所能构成的图形单一，当前方法受路网本身的形状限制，对于特别复杂图形在路网中的搜索尚有不足，提高特大型路网中图形检索效率也是后续工作的研究重点。

参考文献

[1] 周碎平. 从《“健康中国2030”规划纲要》透析全民健身运动的走向[J]. 南京体育学院学报(社会科学版),2017,31(1):59-63

[2] Waschk A, Krüger J. Automatic Route Planning for GPS Art Generation[C]//SIGGRAPH Asia 2018 Technical Briefs,2018

[3] Balduz L P. Walk Line Drawing[D]. Universitat Politècnica de Catalunya,2017

[4] 陆黎娟. 基于手绘图形的空间检索方法研究[D]. 淄博:山东理工大学,2020

[5] 帅赟,艾廷华,帅海燕,等. 基于形状模板匹配的多边形查询[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(12):1 267-1 270

[6] 丁克松,岳建伟,唐宏,等. 矢量图形相似性度量方法研究进展[J]. 地理空间信息,2020,18(4):53-56

[7] 辛全波,毕金强. 基于拓扑关系的面状地形要素提取方法[J]. 地理空间信息,2019,17(4):88-91

[8] 韦人玮,吴小芳,杜清运. 基于图模型和拓扑约束的管网数据一致性检测[J]. 地理空间信息,2006,4(1):52-54

[9] 祖似杰,张攀,罗跃军. 基于车道驾驶态势的拓扑构建与路径规划[J]. 地理空间信息,2018,16(5):53-56

[10] 刘硕,刘如飞,柴永宁. 一种基于结构特征匹配的道路标识线分类方法[J]. 地理空间信息,2021,19(3):14-17

[11] 刘硕. 基于拓扑特征的手绘草图与矢量地图匹配方法研究[D]. 淄博:山东理工大学,2018

[12] 储节磊,龚晖. 矢量图形的比较识别研究[J]. 计算机应用与软件,2010,27(12):250-252

[13] Zhang M. Methods and Implementations of Road-network Matching[D]. Technische Universität München,2009

[14] 廖伟华. 基于二元关系的GIS实体拓扑关系的粗糙表达[J]. 地理空间信息,2012,10(1):97-98

[15] 彭召军,王青山,熊伟,等. 基于改进四叉树的地理实体快速查询算法[J]. 地理空间信息,2017,15(1):32-35