引文格式：毛宏宇,效朝阳,蒋友龙,等. 基于栅格的室内平面路网自动构建方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):47-50. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.010

基于栅格的室内平面路网自动构建方法

毛宏宇[1]，效朝阳[1]，蒋友龙[1]，田仁涛[1]，陈　团[2]
（1. 四川省第八地质大队，四川 西昌 615000；2. 重庆交通大学智慧城市学院，重庆 400074）

摘　要：随着自动泊车、机器人服务等智能化行业的发展，以及室内服务需求的增加，传统手动方法与三角剖分法构建的路网模型难以满足高新技术作业的要求。因此，提出一种基于栅格的室内平面路网自动构建方法，该方法首先基于语义信息提取构建室内平面地图的必要要素，并将其转化为栅格；然后将栅格划分为可通行区域与不可通行区域，再通过深度优先搜索算法将室外区域障碍化；最后利用细化算法提取可通行区域的中心线，从而构建室内平面路网模型。通过对不同方法构建的路网进行对比分析，结果表明，该方法在完整度、相似度和构建时间成本上表现更佳。

关键词：栅格地图；室内路网；细化算法；骨架提取
中图分类号：P283　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0047-04

Indoor Plane Road Network Automatic Construction Method Based on Raster

MAO Hongyu[1], XIAO Chaoyang[1], JIANG Youlong[1], TIAN Rentao[1], CHEN Tuan[2]
(1. The 8th Geological Brigade of Sichuan, Xichang 615000, China;
2. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With the development of intelligent industries such as automatic parking and robot services, as well as the increasing demand for indoor services, the road network models constructed by traditional manual methods and triangulation methods are no longer able to meet the requirements of high-tech operations. Therefore, we proposed an automatic construction method for indoor plane road network based on raster. We extracted the necessary elements for constructing indoor flat maps based on semantic information, and converted them into raster at first. Then, we divided the raster into passable and non-passable areas, and used depth first search algorithm to block the outdoor area. Finally, we used a refinement algorithm to extract the centerline of passable area, thereby constructed an indoor plane road network model. By comparing and analyzing road networks constructed by different methods, we found that this method performed better in terms of completeness, similarity and construction time cost.

Key words: raster map, indoor road network, refinement algorithm, skeleton extraction

构建室内空间栅格路网的核心在于选择适当的细化算法[1]。当前使用较多的细化算法有 Hilditch 算法、Pavlidis 算法、基于 Voronoi 图的算法、轮廓筛减算法和 ZS 细化算法等[2-6]。与其他算法相比，ZS 细化算法采用逻辑操作反复删除非骨架像素点，具有迭代次数少、收敛快以及能较好保留物体形状和细节的特点[7-11]。因此，本文利用 ZS 细化算法自动构建室内平面栅格路网，首先，基于计算机辅助设计图（computer-aided design，CAD）提取构建室内平面地图的必要要素；然后根据通行性创建室内栅格地图；最后，利用 ZS 细化算法对可通行区域进行处理，提取出骨架线，以构建室内栅格路网模型。

1　室内栅格地图建模

使用栅格法对室内环境进行建模时，先将空间平面划分为相同大小的栅格单元，并依据通行性为每个单元赋予对应的值。行人能到达的可通行区域赋值为 1；行人无法到达的不可通行区域赋值为 0。即使障碍物未完全填满一个栅格，也视为一个完整的栅格进行处理，如图 1 所示。

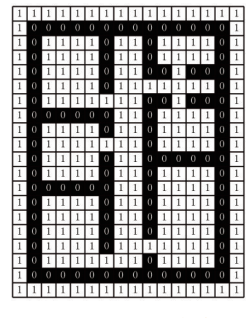


图 1　栅格地图的像素矩阵

2　基于 ZS 细化算法的平面路网构建

ZS 细化算法是一种图像处理算法，该算法通过迭代的方式逐步删除二值图像中的像素点，最终得到图像的骨架结构。

第一作者简介：毛宏宇（1997—），硕士，从事地图学和地理信息系统、摄影测量与遥感工作，E-mail：mhy_upp@163.com。

2.1 基本定义

在给定的二值图像中，像素值等于1的点被定义为前景点（即自由栅格），而像素值等于0的点则被视为背景点（即障碍栅格）。其中，前景点代表可以通过的区域，而背景点则表示障碍物或无法穿越的区域。在处理二值图像时，选取任意一个前景点P_1，其周围的8个相邻像素点（P_2，P_3，P_4，P_5，P_6，P_7，P_8）构成了P_1的8邻域，如图2所示。相关定义和概念如下。

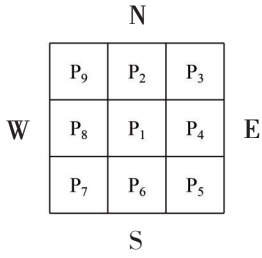


图2 P_1的8邻域

连接数 $N(P_1)$：P_1的8邻域中前景点的数量；交叉数 $M(P_1)$：按顺时针方向遍历P_1的8邻域，背景点转变为前景点的次数；孤立点：P_1的8邻域全是背景点，即所有相邻点的像素值均为0；端点：P_1的8邻域中只有一个前景点，其余点全是背景点；内部点：P_1的8邻域中所有点均为前景点，即所有相邻点的像素值均为1；边界点：P_1的8邻域中至少有一个背景点。

2.2 算法实现流程

ZS细化算法通过逐步删除栅格地图中的边界点来提取路径，这一过程涉及对每个点的8邻域像素值进行分析，以确定该点是否应被移除，算法不会删除内部点、孤立点和端点。细化过程分为2个阶段：阶段一，奇数次迭代，遍历栅格地图，寻找符合条件1、2、3、4的边界点，并将其标记为删除候选点，遍历完成后删除标记点；阶段二，偶数次迭代，遍历栅格地图，寻找符合条件1、2、5、6的边界点，标记这些边界点，遍历完成后删除标记点，算法不断交替执行这2个阶段，直到无法标记新的删除候选点。此时，所有剩余的点将构成一组连通的线条，形成栅格路径。相关条件如下：条件1，$2 \leqslant N(P_1) \leqslant 6$；条件2，$M(P_1)=1$；条件3，$P_2 \times P_4 \times P_6 = 0$；条件4，$P_4 \times P_6 \times P_8 = 0$；条件5，$P_2 \times P_4 \times P_8 = 0$；条件6，$P_2 \times P_6 \times P_8 = 0$。

在条件1中，$N(P_1)$的范围设定在2~6之间是为了规定P_1点不是端点或孤立点，从而保证了骨架的连贯性及结构稳定性；条件2确保了删除的像素点不会破坏路径的连通性；条件3到条件6分别针对不同方向的非骨架像素点进行标记，进而确保细化过程中保留核心路径骨架，同时移除冗余像素点。

3 实验验证及结果分析

3.1 室内平面楼层栅格地图构建

以某教学楼和购物商场的单层CAD建筑设计图为数据源，利用ArcGIS软件进行室内平面楼层栅格地图的建模。

1）数据预处理。CAD建筑设计图包含了建筑的平面形式、大小尺寸、房间、建筑入口、门厅及楼梯等信息，其中有许多与构建室内环境无关的数据。因此，本文利用ArcGIS软件对CAD数据进行清洗，以图层名作为筛选条件（如表1所示）提取出墙体、窗户和柱子等构建室内平面空间的必要要素，并将其转化为栅格数据。

表1 图层要素提取

要素类型	要素名称	图层名
线要素	墙	墙/分户墙/幕墙/WALL/CURT
线要素	柱子	柱子/COLUMN
线要素	窗	窗/Window

2）栅格优化。在初步提取的栅格数据中有较多的不规则栅格，利用ArcGIS软件的扩展和平滑功能对不规则栅格进行处理，将障碍物匹配到栅格单元的大小。

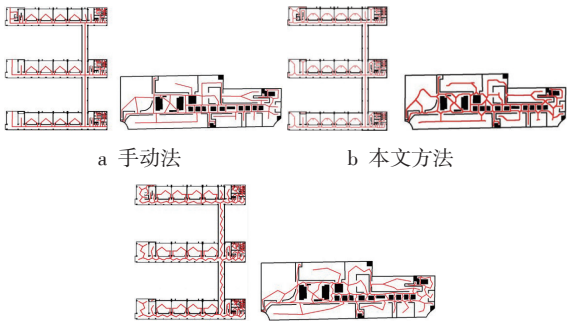
3）室内栅格地图建模。将矢量数据转化为栅格数据时，要素区域被认为是不可通行区域，栅格值为0（黑色）；空白区域被认为是可通行区域，栅格值为1（白色）。在该过程中，室外空间被认为是可通行的，但考虑到本文研究的重点是室内空间，因此通过深度优先搜索算法[12]修改室外空间的栅格值。

深度优先搜索算法总是遍历室外空间的像素点，由于室内空间被墙体包围，当搜索到墙体的像素点时，算法会返回到上一个节点并继续寻找未遍历的点。步骤如下：①从室外空间选取起点（0，0）；②检查起点的像素值，如果是1，将其改为0；③逐一检查起点的相邻点，如果相邻点的像素值为1，则改为1，如果相邻点的像素值为0，跳过处理。④当没有新的相邻点可访问时，回溯到上一个未访问的节点。⑤持续这些操作，直到所有白色像素点都被转换为黑色。以上步骤处理后，室外区域被转化为黑色的障碍栅格，按照该方法获取了某教学楼和购物商场单层室内平面栅格地图。

3.2 室内楼层平面路网构建

基于教学楼和购物商场的室内平面楼层栅格地图，利用Python语言实现对室内楼层平面路网的构建，编程环境为PyCharm Community Edition 2022.2.3。此外，还采用手动法和三角剖分法构建路网模型，手动法通过中轴线与空间质心点的连线构建室内路网，三角剖分法参考文献[13]，路网模型构建结果如图

3所示。



a 手动法　　b 本文方法

c 三角剖分法

图3　不同方法在不同场景构建的路网模型

3.3　结果分析

以手动法生成的路网模型作为标准路网模型（见图3a），对比分析本文方法生成的路网模型（见图3b）与三角剖分法生成的路网模型（见图3c），从路网完整度、相似度和构建时间成本3个方面进行评估。完整度指路径在室内空间中的可达性，确保每个区域都能通行；相似度指路径与手动生成的标准路径在形状上的相似性；构建时间成本指对同一实验数据处理得到路网模型所花费的时间。

3.3.1　路网完整度分析

统计3种方法构建路网模型的节点个数、路径条数和总路径长度，如表2所示。节点指的是至少有3条路径交汇的点，而路径数则是通过以这些交汇点为断点将总路径分割后的总数。

表2　路网要素统计结果

场景	要素类型	手动法	本文方法	三角剖分法
教学楼	节点/个	81	90	88
	路径/条	165	179	172
	总路径长度/m	709.57	812.80	855.01
购物商场	节点/个	54	58	56
	路径/条	93	102	98
	总路径长度/m	1 159.83	1 191.35	1 255.35

从表2中可以发现，本文方法通过提取可通行空间的骨架线来构建路网模型，因此能完整考虑每个可通行区域。而手动法在构建路网模型时，仅考虑了行人可能需要到达的区域。因此，本文方法构建的路网模型在2个场景下的节点数相较于标准路网模型分别增加了11.11%和7.40%。相比之下，三角剖分法通过对每个可通行区域进行三角剖分，并依次连接三角形质心来构建路网模型，节点数在2个场景中分别增加了8.64%和3.70%。节点数的增加通常会导致路径数和总路径长度的增加。虽然本文方法构建的路网模型在2个场景下的节点数最多，但其总路径长度却小于三角剖分法构建的路网模型。探究其原因，三角剖分法构建的路网模型中出现了较多“蛇形”路径，而本文方法构建的路网模型则避免了这一问题，因此总路径长度相对较小。

综上所述，虽然本文方法构建的路网模型节点数较多，但形成的路网更加详细，其总路径长度与标准路网模型更为接近。结合图3可以得出，本文方法构建的路网模型在完整性方面优于三角剖分法，且与标准路网模型相比，具备更高的可达性。

3.3.2　路网相似度分析

2种路网对应位置的2个导航节点作为一组匹配点对，连接匹配点对以形成封闭区域，2个距离最近匹配点对之间的路径形成交叉区域，如图4所示。

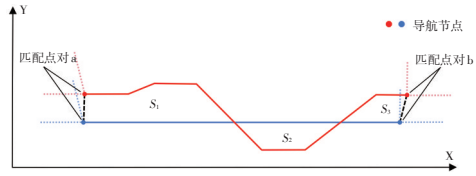


图4　路径交叉区域示意图

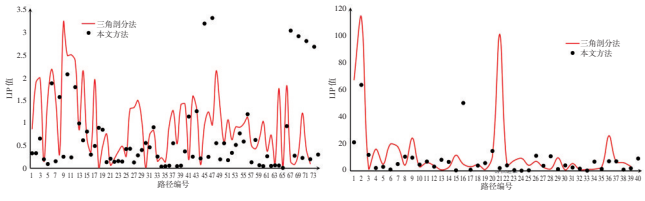
引入多线位置距离[14]（locality in-between polylines，LIP）作为路网相似性度量方法，其定义如下：

$$\mathrm{LIP}_{ab}=\sum S_i\times\omega_i \tag{1}$$

式中，S_i为ab间路径围成区域的交叉面积；ω_i为ab间路径围成区域交叉面积的周长与路径总长度的比值；i为ab间路径的交叉面积个数。分别统计本文方法和三角剖分法构建的路网模型与标准路网模型的LIP值。LIP值越小，2条路径间的缝隙越小，说明轨迹之间的距离越近，路网的相似度越高。2个场景中本文方法和三角剖分法构建的路网模型与标准路网模型的总LIP值，如图5所示。

在教学楼和购物商场2个场景中，本文方法构建的路网模型与标准路网模型的总LIP值均小于三角剖分法构建的路网模型，表明本文方法的相似度更高。需要指出的是，购物商场的路网模型与标准路网模型的总LIP值明显高于教学楼，主要是因为购物商场的总面积大约是教学楼的2倍多，而LIP的值会随场景面积的增大而增加。

然后，通过观察LIP值对比图发现，在图5a中，本文方法构建的路网模型与标准路网模型在部分路径（如45、47和67）上的LIP值过大，主要原因是这些路径间仅有一个交叉区域，即$w_i=1$，$\mathrm{LIP}_{ab}=S_i$。而在图5b中，部分LIP值同样偏大，这主要是因为某些路径与标准路网相比有较大偏差，并且由于购物商场的面积较大，这些因素共同作用导致了这样的结果，特别是在图4所示的购物商场路网左上角部分。若忽



a 教学楼 b 购物商场

图5 不同方法的LIP值对比图

略上述情况，本文方法构建的路网模型在各路径段与标准路网模型的LIP值普遍低于通过三角剖分法构建的路网模型与标准路网模型的LIP值。

最后，对LIP值的区间频数进行统计，对于教学楼，采用2种不同方法构建的路网模型与标准路网模型的LIP值在[0，1]区间内的占比分别为82.4%和59.7%；对于购物商场，在[0，10]区间内，分别占比80%、74.4%。因此，无论是在教学楼还是在购物商场，本文方法构建的路网模型与标准路网模型的LIP值在较小区间内占比都更高。综上所述，通过本文方法构建的路网模型与标准路网模型的路径轨迹距离更近，路网的相似度更高。

3.3.3 构建时间成本分析

通过ArcGIS软件分别基于手动法和三角剖分法进行室内平面路网模型的构建。首先通过ArcGIS软件进行室内平面楼层栅格地图的构建；再通过事先编写好的ZS细化算法构建室内楼层平面路网。上述实验均采用同一台计算机进行，构建时间成本如表3所示。

表3 构建时间成本

构建方法	使用工具	耗时/min	
		教学楼	购物商场
手动法	ArcGIS	55	45
三角剖分法	ArcGIS	30	23
本文方法	ArcGIS、Python	10	8

从上表可以看出，在两个场景中，相较于其他两种方法，使用本文方法构建路网模型的时间成本更低，效率更高。这是因为本文方法是通过持续删除可通行区域的边界点来提取路径，整个过程可以通过计算机并行处理，从而提高计算效率。而三角剖分法在构建三角网时，如果点集较大，会影响构网速度，且在构网完成后，还需提取三角形的质心点，并依次连接这些质心点来形成路径，导致效率较低。手动法则由于需要人工提取，效率最低。

4 结 语

本文提出了一种基于栅格的室内平面路网自动构建方法，通过提取CAD建筑平面图的关键特征并转化为栅格数据，对栅格数据进行处理后构建室内平面楼层栅格地图，再利用ZS细化算法提取室内可通行空间的中心线，最终构成室内平面路网模型。利用教学楼和购物商场2个场景进行实验，结果表明，本文方法存在以下优势：①有效地避免“蛇形”路径和转弯处出现路径穿墙问题，提高了路网模型准确度；②利用ZS细化算法基于室内栅格地图自动构建路网模型，提高了构建效率；③构建的路网模型不仅可以为行人服务，还可以应用于移动机器人等使用栅格地图进行路径规划的智能设备。

参考文献

[1] 冉宁，张家明，杨宏飞，等. 基于语义分割网络的AGV路径规划算法[J]. 电子测量与仪器学报，2023，37(7):121

[2] 朱建阳，张旭阳，蒋林，等. 基于骨架关键点重规划的Voronoi图法路径规划[J]. 农业机械学报，2022，53(3):215-224

[3] Cheng J. Dynamic Path Optimization Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Advanced Transportation，2023，1(1):1-14

[4] Prakash R P，Keerthana S P，Binu V P. Thinning Algorithm Using Hypergraph Based Morphological Operators[C]// 2015 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)，Banglore，India，2015:1 026-1 029

[5] Tu K，Yang S，Zhang H，et al. Hybrid A Based Motion Planning for Autonomous Vehicles in Unstructured Environment[C]//2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Japan，May 26-29，2019:2 741-2 744

[6] Yue Y P，Liang C Z，Bing X L，et al.Generation of Navigation Networks for Corridor Spaces Based on Indoor Visibility Map[J]. International Journal of Geographical Information Science，2020，34(1):1-25

[7] 袁良友，周航，韩丹，等. 引入平滑迭代的骨架提取改进算法[J]. 计算机工程与应用，2020，56(24):188-193

[8] 陈品，王涛，张德港. 一种基于模板的二阶段ZS细化算法[J]. 计算机技术与发展，2023，33(2):44-49

[9] 常庆贺，吴敏华，骆力明. 基于改进ZS细化算法的手写体汉字骨架提取[J]. 计算机应用与软件，2020，37(7):107-113

[10] Lynda B B，Basel S，Abdelkamel T. A Modified ZS Thinning Algorithm By a Hybrid Approach[J]. The Visual Computer，2018，34(5):689-706

[11] 胡鑫，欧阳华，侯卓成，等. 基于改进ZS细化算法的指针骨架提取[J].自动化与仪表，2021，36(12):51-56

[12] 王勇睿. 深度优先搜索算法的应用研究[J]. 网络安全和信息化，2022，6(11):95-97

[13] 李华蓉，彭映雪，李海明. 室内楼层平面导航路网模型的自动生成[J]. 测绘通报，2021(4):79-84

[14] 马宁，于铁龙，孟庆山.农机运行轨迹相似性度量研究[J]. 现代化农业，2022，43(7):34-37