

DOI:10.19479/j.2095-719x.2405346

## 改进 PRM 在特定复杂环境下的路径规划

杨振舰, 张国良

(天津城建大学 计算机与信息工程学院, 天津 300384)

**摘要:**针对传统概率路线图法(probabilistic roadmap methods, PRM)在特定复杂场景(场景中存在十字形的窄通道连通区域,且最终规划出来的路径必定会经过十字形的窄通道连通区域)下路径规划成功率低的问题,提出了一种改进的 PRM 方法.在学习阶段,首先使用 Fast(features from accelerated segment test)角点检测算法来检测给定地图环境的角点;然后根据检测出来的角点计算地图的主要连接区域(十字形的窄通道连通区域中心的矩形),通过对这些主要连通区域额外随机采样一个点,从而增加了主要连通区域的采样点数量,提高了窄通道和自由区域的连通性.仿真结果表明,优化 PRM 路径规划的成功率比传统 PRM 的成功率高出 70%,路径规划时间缩短了 1.2 s,因此改进的方法大大提高了 PRM 算法的效率.

**关键词:**路径规划; PRM 算法; Fast 算法; 特定复杂环境; 主要连通区域

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2024)05-0346-08

## Improved PRM Path Planning in Specific Complex Environments

YANG Zhenjian, ZHANG Guoliang

(School of Computer and Information Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** The authors propose an improved PRM method to solve some problems about the traditional probabilistic roadmap methods (PRM) which has a low success rate in specific complex environments (a cross-shaped narrow channel connection area exists in this complex scene, and the final planned path must pass through the cross-shaped narrow channel connection area). In the learning phase, the authors first use the Fast (Features from Accelerated Segment Test) corner point detection algorithm to detect the corner points of a given map environment, and then calculate the main connection area (the rectangle in the center of the cross-shaped narrow channel connection area) of the map based on the detected corner points. By randomly sampling an additional point in these main connected areas, the number of sampling points in the main connected area can be increased and the connectivity of narrow channel can be improved. The free area simulation results show that the success rate of optimized PRM path planning is 70% higher than the success rate of traditional PRM, and the path planning time is shortened by 1.2 s, so the improved method greatly improves the efficiency of PRM algorithm.

**Key words:** path planning; PRM algorithm; fast algorithm; specific complex environment; mainly connected areas

随着移动机器人技术的发展,路径规划一直都是机器人领域的核心部分,也是移动机器人要完成其他任务的第一步,因而路径规划已经被国内外学者广泛研究,该相关的算法也非常多,从智能启发优化算法如蚁群算法<sup>[1]</sup>、粒子群算法<sup>[2]</sup>、遗传算法<sup>[3]</sup>、A\* 算法<sup>[4]</sup>、人工势场<sup>[5]</sup>等再到基于随机采样的概率路线图<sup>[6]</sup>(PRM)、快速探索随机树<sup>[7]</sup>(RRT)等.而对于环境比较复杂时,用人工势场,蚁群算法和遗传算法这类算法模型难度和计算量非常大,而对于随机采样的 PRM 则可以很好地解决复杂环境约束中的路径规划的问题,并且在

移动机器人路径规划中得到了广泛的应用.

PRM 是对给定地图环境的自由区域进行随机采样,并连接采样好的可行点进行路径图的构建,地图中的每个区域空间采样的概率是相同的.然而,在本文研究的特定复杂环境下,很难保证在地图的主要连通区域内获得采样点,这给构建路径图带来了很大的困难,甚至无法构建路径图.因此,实时检测地图中的主要连通区域并且有效提高采样率非常重要.基于 Boor 高斯采样<sup>[8]</sup>的 PRM 算法大大增加了障碍物附近的采样点,高斯采样是通过随机在地图的内部选取一

收稿日期:2023-03-17;修订日期:2023-04-05

基金项目:天津市自然科学基金(19JCTPJC50000)

作者简介:杨振舰(1975—),男,山东聊城人,天津城建大学教授,博士.

个点,然后在该点的基础上通过一个合适的距离进行高斯采样得到另外一个点,如果这两个点当中有一个点在障碍物内部且另外一个点在自由区域,则将该点加入路径构建集.高斯采样提高了窄道的内部的采样点的数量,但是大多时候主要连通区域采样的效果并不理想,甚至是大部分的采样点落在了障碍物的附近,导致无法构建路径图.基于Hsu提出的一种桥测试的PRM<sup>[9]</sup>算法,增加了窄通道的路径内部的连通率,桥测试方法是随机选取在障碍物中的一个点和该点通过高斯采样获得的另外一个在障碍物中的点进行连接,如果这两个点的中点位于自由区域,则将该点加入路径构建集,大大增加了地图的窄通道路径中的采样点个数.然而,因为随机采样策略的原因,在复杂环境下主要连通区域获得的采样点的效果也不太理想,而且在地图的离障碍物比较远的空旷区域内,桥测试法采样的效率低.文献[10]提出了一种PRM学习阶段基于最优抽样策略的改进方法.该方法在随机采样时将落在障碍物中的点按距离均匀采样,在该点的附近的自由区域内生成采样点,从而增加了窄通道的采样点数量,但该方法在复杂环境下进行采样时,主要连通区域无采样点的概率也比较大<sup>[10]</sup>.

本文针对特定复杂环境下主要连通区域采样点不足的情况,提出了一种结合角点检测连通区域的PRM算法,从而在学习阶段改进了PRM的采样策略.首先使用FAST角点检测算法<sup>[11]</sup>对给定的地图环境进行角点检测,得到所有角点;再通过角点计算主要连通区域并在这些区域内额外各随机采样一个点;然后再进行整体随机采样.该方法确保在主要连通区域最少有一个采样点来保证窄通道和自由区域的连通性.本文一共分为五个部分:第一部分介绍了FAST角点检测算法;第二部分介绍了传统的PRM算法的基本原理和存在的不足;第三部分介绍了基于FAST角点检测改进PRM的原理和步骤;第四部分对改进的PRM算法进行仿真实验且与其他的算法进行了实验对比和结果分析;第五部分对改进算法进行了总结.

## 1 概率路线图

### 1.1 Fast角点检测算法

文中使用的Fast算法是一种角点检测算法,其思想源于corner的定义,也就是检测一个点周围的像素点的像素值,如果该点的周围领域内有足够多的像素点,并且该点的像素点特征差异够大,则认为该点为角点.

Fast算法检测数字模型如图1所示.假设设定的数目是12,将点 $p$ 与圆上的16个像素点比较其灰度值,如果灰度差绝对值大于某阈值的点数且该点数大于等于设定的数目,则认为该点是角点.

首先判断点1和点9的灰度值与点 $p$ 的灰度值的差值绝对值是否都大于阈值,如果是则继续往后判断,否则舍去该点.再判断点1、点5、点9和点13这四点与点 $p$ 的灰度值差值大于阈值的数目是否大于2,如果是则继续往后判断,否则舍去该点.最后判断圆周上16点与点 $p$ 的灰度值差值大于阈值的数目是否不小于12,如果是则认为该点是角点.

进行非极大抑制,首先计算角点的Fast得分(记为 $V$ ),也就是上一步中12个连续像素点的像素值与该点像素值的差值的绝对值之和,即

$$V = \max \begin{cases} \sum (\text{pixel values} - p) \text{ if } (\text{value} - p) > t \\ \sum (p - \text{pixel values}) \text{ if } (p - \text{value}) > t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V$ 为角点的Fast得分;pixel values为符合条件的连续12个像素点的像素值; $p$ 为候选点的像素值,value为点 $p$ 周围16个像素点的像素值; $t$ 为阈值.

然后,对于相邻的两个角点,比较它们的Fast得分,保留得分较大的角点.

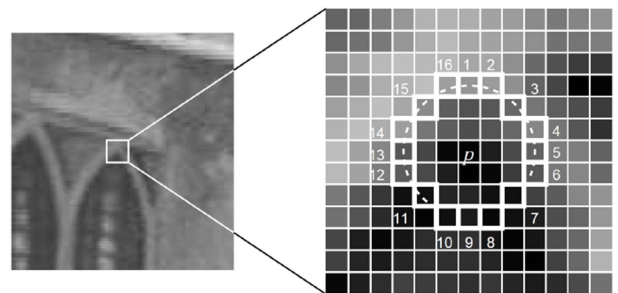


图1 Fast角点检测示例

### 1.2 传统的PRM算法

传统的PRM算法是一种基于图搜索的路径规划算法,它将连续空间转换成离散空间,再利用A\*等搜索算法在路线图上寻找路径,以提高搜索效率.这种方法能用相对少的随机采样点来找到一个解,对大多数问题而言,相对少的样本足以覆盖大部分可行的空间,并且找到路径的概率为1.显然,当采样点太少,或者分布不合理时,PRM算法是不完备的,但是随着采样点的增加,也可以达到完备.所以,PRM是概率完备且不最优的,算法的核心思想是构建连通图,搜索最佳路径.

PRM 算法包含两个阶段：学习阶段、查询阶段。学习阶段的主要内容是在地图中随机采样，采集一系列点，并检测它们是否在自由空间(白色区域)中。如果采样点在障碍物区域，则丢弃该点，否则将自由区域的点保存在点集  $V$  里。在点集里，节点之间通过本地规划器连接起来，将与障碍物无交集的连线保留，然后得到边集  $E$  和权重集  $W$  (各边的长度)。结合起点和终点，最终得到一个无向路径网络图  $G(V, E, W)$ ，如图 2 所示。

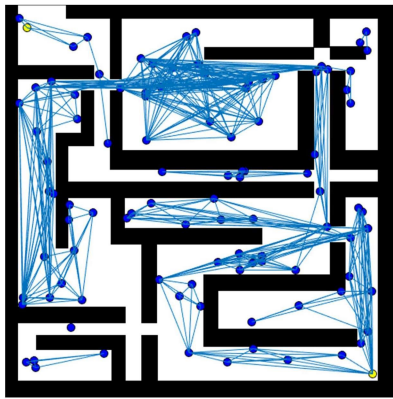


图 2 PRM 构建的无向路径网络

在查询阶段，设置起点和终点后，通过 A\* 启发式搜索算法对无向路径网络图  $G(V, E, W)$  进行路径查找，得到一个合理的路径，如图 3 所示。

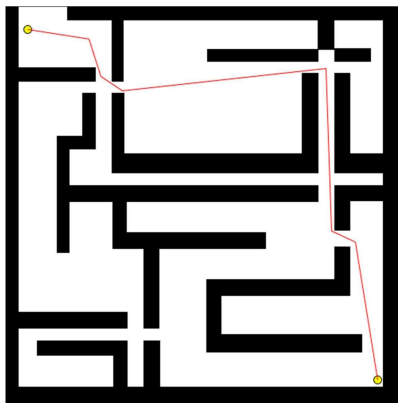


图 3 PRM 查询路径

在学习阶段，PRM 的采样策略采用随机采样，尽可能保证地图的每个区域都获得采样点并合理规划路径。然而，本文研究的是特定复杂环境下的路径规划，最终规划出的路径必定经过主要连通区域，随机采样是不适用的。由于复杂环境下的主要连通区域比较小，随机采样点的数量跟自由区域面积的大小成正比，因而使得这些区域经常无法获得采样点。因此，在采样完成后构建路径图时，主要连通区域内采样点不

足甚至没有采样点会导致最终无法规划出一条合理的路径。假设随机采集 100 个采样点，如果地图中全部主要连通区域(见图 4 中彩色矩形)都没有采样点，则在查询阶段无法通过路径网络图构造路径(见图 5)。

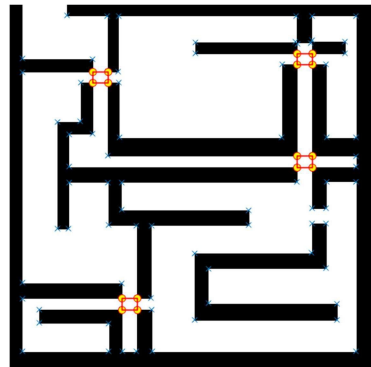


图 4 主要连通区域示例

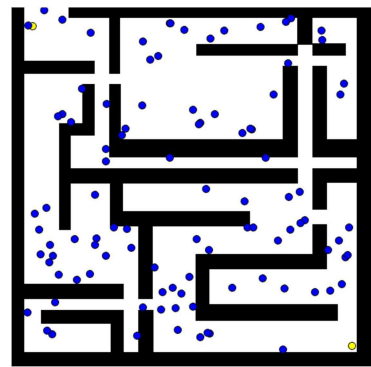


图 5 具有 100 个采样点的标准 PRM

然而，当采样点为 200 时，随着采样点的增加，部分或全部主要连通区域能够获得采样点时，传统的 PRM 就增加了能够找到路径的概率。地图中 4 个主要连通区域有 3 个都获得了采样点(见图 6)，最终查找路径如 7 所示，传统的 PRM 算法成功规划出一条路径。但是，随着采样点的增加，在学习和查询阶段需要花费非常多的时间去构建路径图和寻找路径，这使得 PRM 的效率非常低。

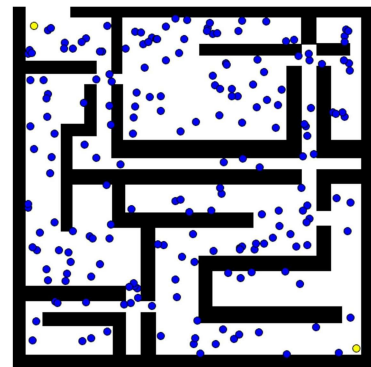


图 6 具有 200 个采样点的标准 PRM

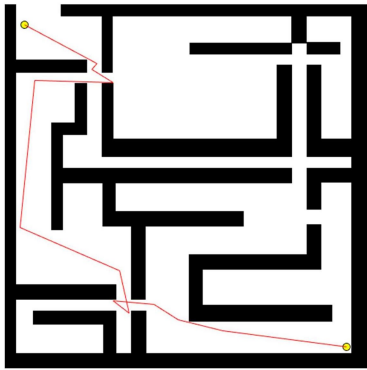


图7 200个采样点查找路径示例

采样点为100时和采样点为200的仿真实验数据对比如表1所示.当采样点为100个时,路径规划的时间为3.5 s,地图中主要连通区域无采样点,路径规划失败;当采样点为200时,路径规划时间为11.2 s,地图中主要连通区域采样点的数量为5,最终可以规划出一条路径.

表1 不同采样点的实验数据对比

采样点	时间/s	主要连通区域采样点的数量
100	3.5	0
200	11.2	5

因此,针对于这种特定复杂环境下的路径规划,本文需要一种在保证PRM的效率情况下针对这些主要连通区域进行采样的方法.

### 1.3 基于Fast的采样改进方法

在本文研究的特定复杂环境下进行路径规划时,由于传统的PRM算法采用随机采样的原因,地图中较小的主要连通区域通常很难采集到样点,而这些区域又是连接其他区域的重要枢纽,如果全部的主要连通区域都没有获得采样点,则在学习阶段将无法构建路径网络图.因此,PRM算法需要在主要连通区域进行额外采样.本文把采样方法分为如下步骤:①在地图中使用Fast算法检测所有角点;②根据每个角点的 $x$ 坐标和 $y$ 坐标计算每一个角点到地图坐标原点的直线距离,然后按照该距离进行升序排列;③遍历排序后的所有角点,按照约束矩形的条件找到符合条件的矩形;④判断矩形是否位于十字形连通区域;⑤在得到的矩形连通区域进行随机采样1个点;⑥在地图内进行全局随机采样.

在学习阶段对传统的PRM进行了改进,采用了Fast检测算法检测出全部角点并计算出地图中的主要连通区域,并在主要连通区域进行额外随机采样一个点,这样可以有效地增加在主要连通区域内的采样点的数量,大大提高了规划出路径的成功率.计算主要

连通区域伪代码如下.

Input:

-img: Input image

-threshold: Threshold value for FAST algorithm to detect corners

-min\_distance: Minimum distance between corner points in the connected area

Output:

-result: Stores the coordinates of the four corner points of the rectangular regions

Function definition:

FAST(img, threshold): Uses the FAST algorithm to detect corner points in the image and returns the corner points list with the specified threshold

Main function:

result = []

corners = FAST(img, threshold)

corners\_sorted = Sort corners according to their distance from the origin

for i in corners\_sorted:

a = i

b, c, d = 0, 0, 0

for j in corners\_sorted[i+1:]:

p = j

if  $\text{abs}(p(3) - a(3)) > 50$ :

break

if  $\text{abs}(p(2) - a(2)) \leq 1$  and  $b == 0$ :

b = p

b = 1

if  $\text{abs}(p(1) - a(1)) \leq 1$  and  $c == 0$ :

c = p

c = 1

if  $b == 0$  or  $c == 0$ :

continue

if  $b(1) - a(1) > 30$  or  $c(2) - a(2) > 30$ :

continue

for k in corners\_sorted[j+1:]:

q = k

```

if abs(q(3) - a(3)) > 50:
    break
if abs(q(2) - c(2)) <= 1 and abs(q(1) - b
(1)) <= 1:
    d = q
    d = 1
    break
if d == 0:
    continue
if Distance between midpoint pixel coordinates
of edges is less than 100:
    continue
result.append([a(1), a(2), d(1), d(2)])
Return result

```

### 2 仿真实验对比

为了验证改进后的 PRM 算法的有效性, 提高本文所研究的复杂环境下对主要连通区域的处理能力, 使用 MATLAB2016a 对本文改进后的 PRM 算法的采样阶段和本文改进后的 PRM、传统的 PRM、高斯采样 PRM、桥测试采样 PRM、文献[10]改进 PRM 算法分别进行了仿真。对改进后的算法学习阶段进行仿真的目的是验证改进后的算法是否能够对特定复杂环境下的主要连通区域进行检测并采样。总体算法仿真主要从路径规划的成功率、路径长度和规划所需要的时间这三方面来进行。根据改进后的算法在这三个方面相比于其他四个算法是否有明显的变化来验证改进算法的有效性。为了更好地说明改进后的算法对主要连通区域的处理能力, 在具有十字形的窄通道连通区域的场景下进行仿真, 其中地图左上角和右下角的黄色点分别表示起点和终点。

改进的 PRM 算法主要体现在学习阶段。在学习阶段: 首先对给定的地图进行 Fast 角点检测; 然后根据上述计算主要连通区域的算法求出地图中的主要连通区域, 在得到的每个主要连通区域中随机采样一个点; 最后在地图全局随机采样。这样保证了地图中的主要连通区域都能够获得采样点, 从而提高主要连通区域周围的窄通道和自由区域的连通率。

为了验证改进的 PRM 在学习阶段是否能够对地图的主要连通区域进行检测, 并且能够在这些主要连通区域内进行随机采样, 对改进的 PRM 算法在学习阶段进行仿真, 如图 8 所示。将改进的 PRM 算法在全局随机采样前检测出地图的全部角点, 并根据检测出

来的角点计算出地图中的主要连通区域(图 8 中彩色矩形标记的矩形为计算出来的主要连通区域)。图 9 为改进后的 PRM 算法对图 8 中检测出的主要连通区域进行随机采样。仿真实验可以看到改进的 PRM 能够检测出地图中的 4 个主要连通区域, 并且能够在这些主要连通区域内进行随机采样一个点, 结果和预期一致。改进的 PRM 算法在学习阶段增加了主要连通区域的采样点数量。

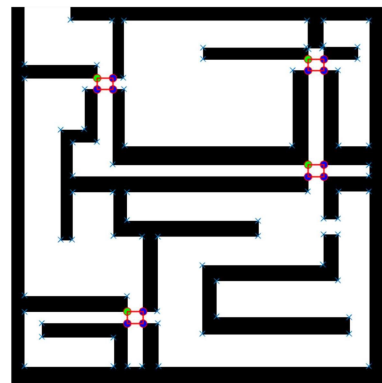


图 8 主要连通区域检测示例

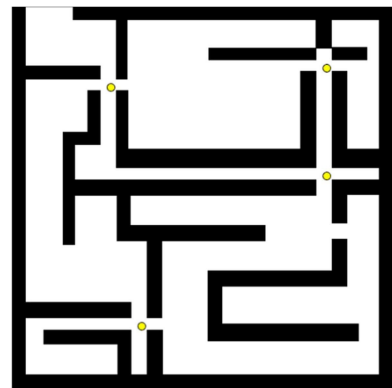


图 9 主要连通区域采样示例

为了更好地验证改进后的 PRM 在这种特定复杂环境下的主要连通区域的适用性, 对不同的地图进行仿真, 结果如图 10 所示。在不同的特定复杂地图下, 改进的 PRM 算法仍然能够非常快速地检测出地图的主要连通区域。图 11 为这些连通区域的随机采样, 其增加了主要连通区域的采样点数量。

经过学习阶段的仿真实验后, 改进后的 PRM 能够在采样阶段计算出地图的主要连通区域, 并在主要连通区域中随机采样一个点, 增加了主要连通区域的采样点数量, 算法在类似环境下对主要连通区域也有很好的适应性。

本文将对改进的算法和传统 PRM、桥测试 PRM、高斯采样 PRM、文献[10]改进 PRM 算法在路径规划整体阶段进行仿真。地图尺寸为 500 × 500, 统一采样点

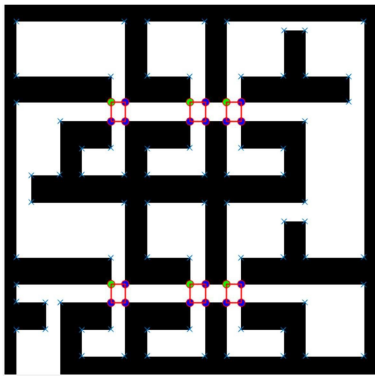


图 10 主要连通区域检测示例

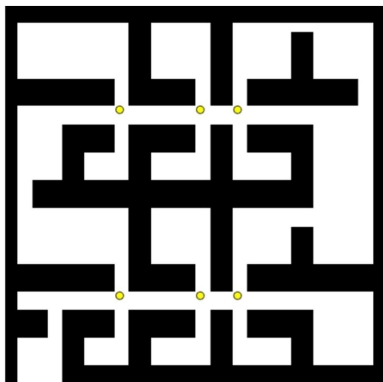


图 11 主要连通区域采样示例

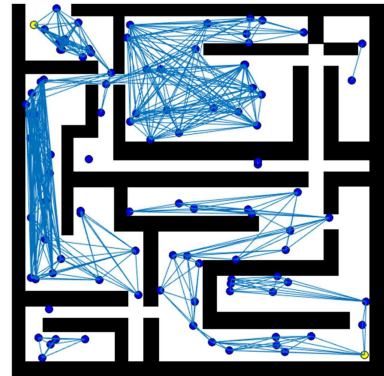


图 12 标准的 PRM

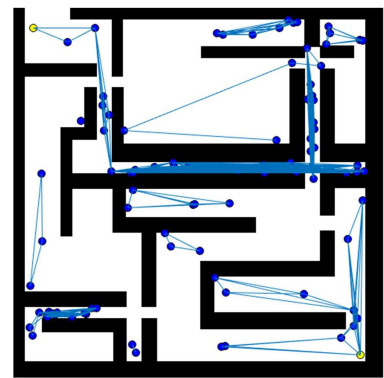


图 13 桥测试采样的 PRM

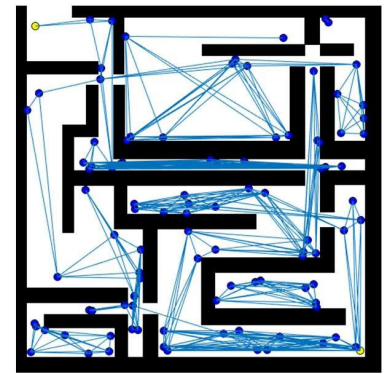


图 14 高斯采样的 PRM

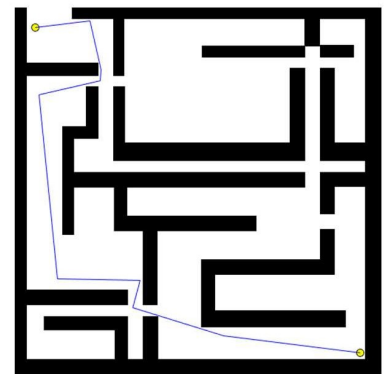


图 15 高斯采样的 PRM 结果

数量为 100. 鉴于改进算法的采样阶段分别额外给主要连通区域单独随机采样一个点, 为了保证公平性, 改进的算法的采样点数量为统一采样点数量减去主要连通区域内的随机采样点的数量. 标准的 PRM 算法运行结果如图 12 所示. 从该运行结果得知, 标准的 PRM 算法在 100 个采样点的情况下无法进行路径规划. 图 13 是桥测试采样算法的运行结果, 同样无法进行路径规划, 因为桥测试采样的特性, 会导致大量的采样点集中在窄通道中, 即使部分主要连通区域获得了采样点, 但是自由区域内的采样点太少, 不利于构建路径图. 图 14 显示了高斯采样 PRM 算法, 图 15 显示了高斯采样的路径规划结果. 图 16 显示了文献 [10]改进 PRM 算法的运行结果, 红色采样点为该算法改进后获得的采样点, 可以看到大部分采样点都集中在在了障碍物附近, 主要连通区域的采样点较少, 无法进行路径规划.

从运行结果来看, 高斯采样方法可以规划路径, 且地图中的两处主要连通区域获得了采样点, 但高斯采样获得的点大多数位于障碍物附近, 对主要的连通区域的采样并不能保证有较高的采样率, 因此成功率也不高.

图 17 是改进的 PRM 算法的学习阶段, 红色的四

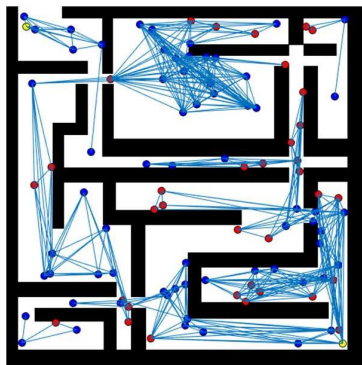


图 16 文献 10 改进的 PRM

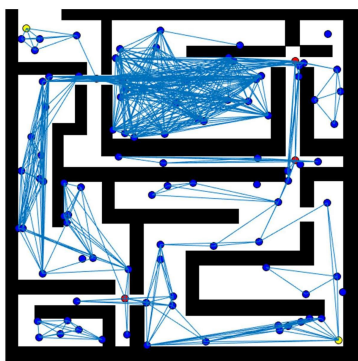


图 17 改进的 PRM

个采样点是检测主要连通区域后并在这些区域进行随机采样获得. 图 18 是改进的 PRM 路径规划结果. 从实验结果来看, 改进的 PRM 可以很好的在这些特定的复杂环境下对主要连通区域进行额外采样, 而且识别地图的 Fast 角点检测算法速度非常快, 即使检测主要连通区域需要花费一些时间, 但是当主要连通区域获得采样点后, PRM 算法在查询阶段的效率会非常高. 总体来看, 改进的 PRM 和其他四种算法在时间上相比较并没有多大劣势.

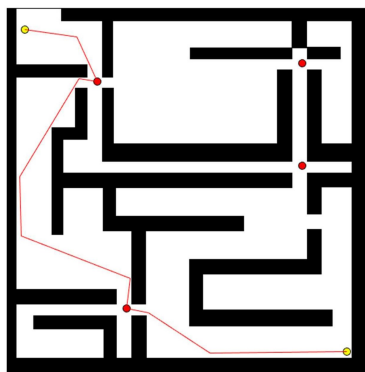


图 18 改进的 PRM 结果

为了验证改进算法的有效性, 在相同的地图以及采样点下, 对每个算法进行 50 次重复实验, 实验结果如表 2 所示.

表 2 五种算法比较结果

算法	成功率/%	平均路径/m	平均规划时间/s
标准 PRM	14	945.51	4.56
桥测试	14	940.21	3.82
高斯采样	16	935.38	3.51
文献 10 改进 PRM	18	938.52	3.46
改进后 PRM	84	932.11	3.32

如表 2 所示, 在处理这些十字形的窄通道连通问题时, 本文改进后的 PRM 算法比其他的算法更具实用性. 传统的 PRM 算法和基于桥测试及高斯采样的 PRM 算法、文献[10]改进 PRM 算法路径规划的成功率很低. 经过实验比较, 改进的 PRM 在类似特定复杂环境下取得了成功, 该算法路径规划的成功率远远高于其他四种算法. 在路径规划的长度方面, 改进的 PRM 算法比其他四种算法的规划路径更短. 在规划时间上, 改进的 PRM 相比于其他四种算法有更快的速度, 规划时间更短. 经过反复实验, 改进后的 PRM 在成功率上有了很大提高, 总体的规划效率得到了显著提高.

### 3 结 语

在本文研究的特定复杂环境下, 由于十字形的窄通道中心的主要连通区域采样点数量的不足, 导致了路径规划成功率不高, 为了解决这种不足, 本文提出了一种改进的 PRM 算法. 首先, 通过 FAST 检测算法得到角点. 然后, 根据角点求出主要连通区域并对该区域进行额外随机采样, 从而增加了主要连通区域内的采样点数量, 提高了窄通道和自由区域的连通率, 从而提高了路径规划的成功率, 同时使得算法在遇到类似的十字形的窄通道场景时具有更好的适应性. 最后, 对传统的 PRM 算法、桥测试采样、高斯采样方法、文献[10]改进 PRM 算法和本文改进后的 PRM 进行了仿真. 仿真结果表明, 本文改进后的 PRM 算法比传统的 PRM 算法和桥测试采样 PRM 算法的路径规划成功率提高了 70%, 比高斯采样 PRM 提升了 68%, 比文献[10]改进 PRM 算法提高了 66%. 路径规划时间比传统的 PRM 缩短了 1.2 s, 比基于桥测试采样方法和高斯采样方法、分别缩短了 0.5 s 和 0.2 s, 比文献[10]改进 PRM 算法缩短了 0.14 s. 算法的总体规划效率良好, 同时改进后的 PRM 算法具有有效性和稳定性.

### 参考文献:

[1] 何 心, 李志恒, 李 冰, 等. 一种改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J]. 现代制造工程, 2023, 509(2): 36-43.

- [2] 吕柏行, 秦昌礼, 张华强, 等. 一种基于改进 PSO-PIO 算法的 AGV 路径规划方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(3): 82-89.
- [3] 陈高远, 宋云雪. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 302-307.
- [4] 沈克宇, 游志宇, 刘永鑫, 等. 基于改进 A\* 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 75-79.
- [5] 李二超, 王玉华. 改进人工势场法的移动机器人避障轨迹研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(6): 296-304.
- [6] 林俊志, 席万强, 周俊等. 基于改进 PRM 和 APF 的移动机器人路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 1-6.
- [7] 姚相滢, 许伦辉, 林世城. 基于改进 RRT 算法的智能车辆路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 165-169.
- [8] BOOR V, OVERMARS M H, VAN-DER-STAPPEN A F. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners [C]//Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C). Detroit: IEEE, 1999: 1018-1023.
- [9] HSU D, JIANG T, REIF J, et al. The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners [C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (cat. no. 03CH37422). Taipei: IEEE, 2003: 4420-4426.
- [10] CAO K, CHENG Q, GAO S, et al. Improved PRM for path planning in narrow passages [C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Tianjin: IEEE, 2019: 45-50.
- [11] 朱思聪, 周德龙. 角点检测技术综述[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 22-28.

(上接第 329 页)

- [7] 张琳, 贺浩浩, 杨毅. 农业文化遗产与乡村旅游产业耦合协调发展研究: 以我国西南地区 13 地为例[J]. 资源开发与市场, 2021, 37(7): 891-896.
- [8] 胡翔, 付红桥. 旅游产业与省域经济耦合协调发展的实证: 以海南省为例[J]. 统计与决策, 2022, 38(12): 79-82.
- [9] 粟琳婷, 粟维斌. “互联网+”背景下乡村旅游产业链发展研究[J]. 农业经济, 2021(11): 117-118.
- [10] 李眉洁, 王兴骥. 乡村振兴背景下农旅融合发展模式及其路径优化: 对农村产业融合发展的反思[J]. 贵州社会科学, 2022, 387(3): 153-159.
- [11] 冷少妃. 旅游产业集群品牌成熟度及其测评研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [12] 朱颖祯. 溧阳地区民宿成熟度评价及对策研究[D]. 江西: 华东交通大学, 2020.
- [13] 孙旭东, 李雪松, 张博, 等. 绿色低碳新兴产业成熟度评价方法研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 98-107.
- [14] 沈克. 基于旅游地生命周期理论的乡村旅游成长性研究: 以信阳郝堂村为例[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(1): 68-72.
- [15] 赵传松, 任建兰, 张宝雷, 等. 中国旅游产业生命周期判断及其时空格局演变[J]. 统计与信息论坛, 2019, 34(9): 85-91.
- [16] 郑飞. 产业生命周期、市场集中与经济绩效: 基于中国 493 个工业子行业的实证研究[J]. 经济经纬, 2019, 36(3): 81-87.
- [17] 杨立国, 刘沛林, 李强, 等. 旅游小镇成熟度评价指标体系与实证研究: 以首批湖湘风情文化旅游小镇为例[J]. 经济地理, 2017, 37(7): 191-197.