

## 基于群体智能成果的路径规划程序自动生成系统

王雨倩<sup>1</sup>, 丁嵘<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100191;  
2. 北京航空航天大学人工智能研究院, 北京 100191)

**摘要:** 路径规划算法被广泛地应用于各种运动规划任务, 如机器人运动、自动驾驶等。迄今为止, 许多优秀的路径规划算法被提出并被应用于不同领域。对于一个特定的任务环境, 选择合适的路径规划算法能更高效地规划出满足约束条件的较优路径。基于群体智能成果, 以遗传编程算法为框架, 研究快速扩展随机树(RRT)路径规划算法及其变种 RRT-Star 路径规划算法、RRT-Star-Smart 路径规划算法在不同任务环境下的适应度及路径规划效率, 设计出一个路径规划程序自动生成系统。该系统能自主分析当前环境地图特征, 并结合 RRT 路径规划算法及其变种算法的特性, 生成新的、更适配当前环境的路径规划算法。生成的路径规划算法能高效地规划出一条从起始点到目标点的可行路径。

**关键词:** 群体智能; 路径规划算法; 遗传编程; 快速扩展随机树; RRT-Star; RRT-Star-Smart

**中图分类号:** TP181

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-6652.202228

## Automatic path planning program generation system based on swarm intelligence results

WANG Yuqian<sup>1</sup>, DING Rong<sup>2</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China  
2. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract:** Path planning algorithms are widely used in various motion planning tasks, such as robot motion and autonomous driving. So far, many excellent path planning algorithms have been proposed for applications in different fields. For a specific task environment, choosing the appropriate path planning algorithm can plan a better path that satisfies the constraints more efficiently. Based on the results of swarm intelligence, the adaptability and path planning efficiency of rapidly-exploring random tree (RRT) path planning algorithm and its variants RRT-Star path planning algorithm and RRT-Star-Smart path planning algorithm under different task environments were studied. Using genetic programming algorithm as a framework to design a system, which could automatically analyze the map features of the current environment and combine the characteristics of RRT path planning algorithm and its variants to generate new path planning algorithms that were more suitable for the current environment. The generated path planning algorithm can efficiently plan a feasible path from the starting point to the target point.

**Key words:** swarm intelligence, path planning algorithm, genetic programming, rapidly-exploring random tree, RRT-Star, RRT-Star-Smart

### 0 引言

作为运动规划<sup>[1]</sup>问题的研究核心之一, 路径规

划<sup>[2]</sup>算法的研究与应用遍及多个领域。高新技术领域(如机器人自主导航、自动驾驶技术、无人机避障)、决策管理领域(如资源分配问题)等都需要

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-02-01

通信作者: 王雨倩, wyqian@buaa.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No.2017YFB1001802)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB1001802)

利用路径规划算法。理论上路径规划算法可解决所有可被拓扑成点线网络的规划问题。迄今为止,已有多种高效的路径规划算法被提出,如 Dijkstra 算法、模拟退火算法、神经网络算法、A-Star 搜索算法、栅格法等,不同的路径规划算法的适用范围不尽相同。对于特定环境来说,分析环境、确定地图形式、判断是进行全局路径规划还是局部路径规划等,并依此选择最适用于当前环境的路径规划算法是十分必要的。合适的路径规划算法能大大提升规划效率和规划路径的质量。

基于采样的路径规划算法具有概率完整性,能够高效快速地处理高维度复杂的规划问题。Lavelle S M 等人<sup>[3]</sup>提出的快速扩展随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)路径规划算法就是一种经典的基于采样的路径规划算法。RRT 路径规划算法具有快速性和随机性,在搜索过程中倾向于扩展到未被探索过的开放区域,能适应不同的复杂场景。RRT 路径规划算法是一种通用算法,被广泛应用于机器人领域。但使用 RRT 路径规划算法规划出的路径往往不够光滑,不是最优路径。为了弥补 RRT 路径规划算法这一不足之处,有效的 RRT 路径规划算法的改进算法被不断提出,其中,Pérez-Higueras N 等人<sup>[4]</sup>提出了 RRT-Star 路径规划算法,RRT-Star 路径规划算法优化了路径,调整了选定父节点的策略,以“距离起点最近”为准则,并引入了重布线机制,提升了规划路径的质量。相应地,RRT-Star 路径规划算法收敛速率会更慢,执行时间更长。Islam F 等人<sup>[5]</sup>提出了 RRT-Star-Smart 路径规划算法,提出智能采样和路径优化策略,化曲为直,收敛更快,规划出的路径更平滑,路径成本更低。

RRT-Star 路径规划算法和 RRT-Star-Smart 路径规划算法虽然对 RRT 路径规划算法进行了改进,但对于不同的环境,综合考虑规划速率与质量,不能断言哪个算法表现会更好。同时,这些算法受步长、随机概率等参数的影响较大。因此,本文希望能学习这些优秀算法的优缺点,研究其对特定环境的适应性,取长补短,设计一个能生成适用于当前环境的路径规划程序的系统。

遗传编程<sup>[6]</sup>算法是一种进化算法,继承自遗传算法<sup>[7]</sup>,通过进化策略可被用于生成解决特定任务的计算机程序。最经典的基于树的遗传编程算法将程序用树的结构表示,将操作符作为树的节点,将操作数作为叶子节点,通过对树的节点进行操作,

实现交叉、变异等操作;遍历树的结构,执行程序,根据程序执行结果计算适应度,对种群进行排序。种群经过一代又一代的进化,适者生存,优胜劣汰,最终得到能实现特定功能的个体,解析该个体基因型得到所需程序,实现程序的自动生成。Le G C 等人<sup>[8]</sup>提出的软件自动修复算法便是以遗传编程与程序分析算法为基础,对现有代码存留的缺陷进行自动修复。本文以遗传编程算法为基础,构建一个可以自动生成路径规划算法的系统。

路径规划算法应用十分广泛,发展十分成熟,不少高效的路径规划算法已被提出,并且经过实际应用验证可行。但同时,使用者选择出最合适的路径规划算法来解决当前问题的难度也在增大。不同类型的路径规划算法适用范围不同,同一类型的路径规划算法效率差距不大,但是在不同任务环境下,算法的性能会受到影响,因此,无法直观地判断哪种算法最适用于当前应用场景。为此,本文提出一种路径规划程序自动生成系统,该系统基于群体智能<sup>[9-10]</sup>成果,收集高效的 RRT 路径规划算法及其变种算法,并基于遗传编程探索这些算法对环境的适应性,以生成新的最适应当前环境的路径规划算法,该算法规划出的路径质量更优。本文的贡献如下:

(1) 基于群体智能成果,收集高效的 RRT 路径规划算法及其变种算法,基于这些程序的抽象语法树提取其关键代码段,封装成函数;

(2) 将封装后的函数作为遗传编程的编码指令单元;

(3) 基于前缀表达式,将程序指令表示成逻辑上树的结构,执行基于树的遗传编程算法;

(4) 经过遗传编程一代又一代的进化,最终得到能最好完成特定任务的个体,解析该个体的基因型,得到新的、最适用于当前环境的路径规划程序,并获得规划的路径。

## 1 相关技术

### 1.1 抽象语法树

计算机科学中采用树的结构来表示编程语言的语法结构,该树被称为抽象语法树<sup>[11]</sup>。抽象语法树中的节点对应源代码语言中的一种结构。当对源代码进行编译时,语法分析器会生成代码的抽象语法树。利用树这种数据结构的特性,通过对源代码对应的抽象语法树进行指定规则的遍历操作,可以

得到许多子树, 不同子树对应源代码中的不同代码段。基于抽象语法树可以实现代码段的提取与分类。

## 1.2 遗传编程

遗传编程继承自遗传算法。遗传算法是一种通用算法, 应用十分广泛。遗传算法模拟了生物进化的过程, 通过遗传操作和设定的适应度函数对编码空间进行高效的搜索。遗传算法使用随机化技术, 无须提供搜索规则, 并且可以在搜索过程中自动调整搜索方向。遗传编程在遗传算法的基础上进行了修改, 可以应用于程序的生成。

遗传编程<sup>[12-15]</sup>对程序指令进行编码, 将编码后的指令作为基因单位, 通过随机组合构成基因型, 从而生成初始种群。种群中个体的基因型对应可执行的代码。将每个个体基因型转换为对应的程序, 执行这些程序, 将执行结果作为适应度的计算准则, 结合特定的任务需求, 设计相应的适应度函数。在每一代, 遗传编程通过遗传操作(交叉、变异、选择)来提高种群的多样性, 不断增大搜索空间。根据种群的适应度排序进行轮盘选择, 优胜者可以进入下一代。经过一代又一代的进化, 最终得到表现最优的个体。对该个体进行解码, 执行对应的程序, 便可得到处理当前问题的最佳解决方案。

遗传编程执行流程如图1所示。

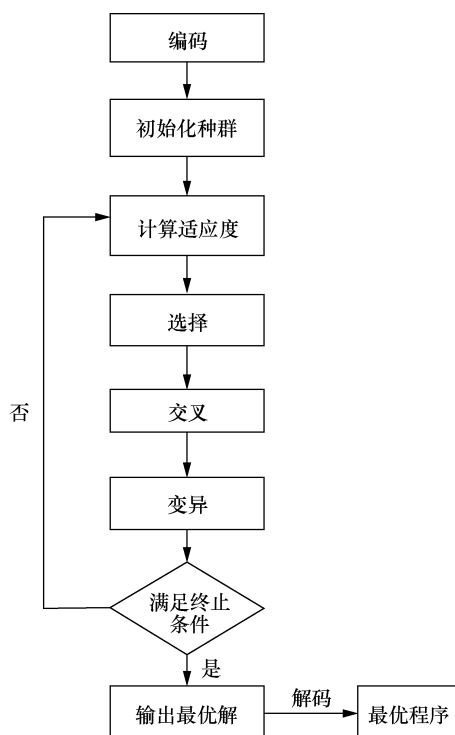


图1 遗传编程执行流程

①编码。遗传编程首先要确定合适的数字化编码方式和基因型的表示形式, 以便于遗传操作的设计。

②初始化种群。根据数字化编码方式, 随机生成一定数目的基因型, 构成初始化种群。

③计算适应度。依据期望生成的程序的功能, 结合程序执行效率判定标准设计对应的适应度函数。将个体的基因型解码为对应程序, 执行程序, 依据适应度函数计算种群中每个个体的适应度。

④选择。根据指定的选择策略从种群中挑选一定量表现优秀的个体, 并将其复制到下一代。

⑤交叉。交换两个父代个体的某个基因片段, 重新组合生成新的个体。

⑥变异。将个体基因型的某个基因替换成其他基因。

⑦更新种群, 若没有出现最优个体, 则转至③。

⑧将表现最优个体的基因型解码为对应程序, 并将其作为最佳方案。

## 1.3 RRT 路径规划算法及其变种算法

### 1.3.1 RRT 路径规划算法

RRT 路径规划算法<sup>[16-19]</sup>是一种基于采样的路径规划算法, RRT 路径规划算法会在整个搜索空间进行随机采样, 只要时间充足、迭代次数不受限, RRT 路径规划算法总能扩展到目标点。RRT 路径规划算法通过快速扩张像“树”一样的路径, 以覆盖空间中的大部分区域, 最终覆盖到目标点。

RRT 路径规划算法的基本步骤如下。

①获取地图信息。RRT 路径规划算法需要在已知空间下进行采样、扩展及碰撞检测, 因此, 需要先获取完整的地图信息, 并明确起始点和目标点。将起始点作为 RRT 树的根节点, RRT 路径规划算法从该节点开始向外探索新区域。

②采样。RRT 路径规划算法采用随机采样策略。每次会随机在搜索空间中采样一个新的点。理论上这个点可以是地图上的任意一个点, 但为了提高搜索效率, 往往会指定一个概率参数, 用于引导 RRT 路径规划算法向目标点方向扩充。

③扩展新节点至 RRT 的树(以下简称 RRT 树)。采样一个点后, 在 RRT 树中找到距离该采样点最近的节点, 沿该节点向采样点方向延伸一个步长得到一个新的点, 并将其扩展到 RRT 树中, 然后将距离采样点最近的节点作为新节点的父节点。在扩展节点的过程中会对延伸的路径进行碰撞检测, 如果该路径与障碍物发生了碰撞, 则舍弃该节点, 不会将此新节点扩展

到 RRT 树中, 以保证最终规划出来的路径的有效性。

④终止扩展。当目标点附近的点被扩展到 RRT 树或达到最大迭代次数时, 搜索终止。

能快速地找到一条从起始点至目标点的无碰撞路径是 RRT 路径规划算法的一大优势, 但 RRT 路径规划算法规划出的路径往往不够平滑, 偏离最优路径。因此, 一些基于 RRT 路径规划算法的变种算法被提出, 这些算法针对 RRT 路径规划算法的不足之处做出了相应的改进, 以优化生成的路径。

### 1.3.2 RRT-Star 路径规划算法

RRT-Star 路径规划算法<sup>[20]</sup>在 RRT 路径规划算法的基础上进行了路径的优化, 调整了为新节点选择父节点的方式, 并引入了重布线操作, 以改变 RRT 树已存在节点的父节点。

①为新节点选择父节点。RRT-Star 路径规划算法以“距离起点最近”为原则。以新获取的采样点为圆心画一个圆, 计算 RRT 树中所有在该圆范围内的节点到起始点的距离与该节点到采样点的距离之和, 将使总和最小的节点作为采样点的父节点, 并将采样点扩展到 RRT 树中。

②重布线。当 RRT 树中加入了新的节点与边后, 对于采样点范围圆中的节点, 计算从起始点通过新节点到达该节点的总距离, 若总距离变小了, 则以新节点为该节点的父节点, 并删除旧边, 连接新边。

### 1.3.3 RRT-Star-Smart 路径规划算法

RRT-Star-Smart 路径规划算法<sup>[21]</sup>引入了智能采样和路径优化策略, 化曲为直, 使得算法收敛更快, 规划出的路径更平滑, 路径成本更低。

①路径优化。RRT-Star-Smart 路径规划算法首先采用 RRT-Star 路径规划算法规划出一条从起始点到目标点的可行路径, 然后从叶子节点开始遍历路径树, 向根节点逐步寻找能无碰撞直连的祖先节点, 更新此祖先节点为当前节点的父节点, 并删去旧边。

②智能采样。RRT-Star-Smart 路径规划算法不再简单地使用随机采样策略, 而是在进行路径优化过程中, 在探索到的障碍物周围创造锚点, 这些锚点通常是无法帮助子节点向根节点进行路径优化的点。在之后的循环中, 选择在这些锚点周围采样, 以加快收敛速度, 规划出更优路径。

## 2 路径规划程序自动生成系统

本文设计的路径规划程序自动生成系统以遗传编程为框架实现代码的自动生成。系统借鉴群体

智能的成果, 学习 RRT 路径规划算法及其改进算法 (RRT-Star 路径规划算法、RRT-Star-Smart 路径规划算法) 的优势及不足之处。利用这些算法的代码的抽象语法树结构, 提取出不同算法的核心代码段, 将其封装成函数作为遗传编程的编码指令, 通过遗传编程的不断进化, 学习这些算法在不同环境下的表现, 并组合生成新的、最适应当前环境的组成方式, 得到新的路径规划算法。

由于 RRT 路径规划算法依赖完整的地图信息, 因此在进行遗传编程之前需要先初始化地图信息。本系统支持离散型和连续型两种类型的二维地图, 通过将地图图像转为二值图像, 根据点的像素值大小实现对不规则图形的碰撞检测。获取地图信息后, 需要设定初始点和目标点以进行路径的规划。

本系统提取多种路径规划程序的关键代码段, 将其封装成函数作为遗传编程的编码指令。将指令按逻辑树结构组合生成前缀表达式, 将此前缀表达式形式作为遗传编程中个体的基因型。通过递归遍历表达式就可以将其转换成代码逐步执行。系统的最终目的是生成路径规划程序, 执行该程序能规划出一条较优的从起始点到目标点的无碰撞路径。基于此, 本系统以规划出的路径的长度为指标, 设计遗传编程的适应度函数, 计算每一代种群中各个个体的适应度, 在无碰撞前提下, 路径总长度越短, 路径质量越优。基于适应度, 择优选择个体复制到下一代进一步进化。

通过遗传操作 (交叉、变异) 提高种群多样性。由于个体基因型基于前缀表达式结构, 逻辑上呈现树的结构, 对个体的遗传操作实际上是对树的子树进行操作, 通过对树进行遍历、交叉两棵树的子树、替换树的节点, 完成交叉和变异操作, 并且不会破坏程序的可执行性。

依据适应度函数, 可以计算出每个个体的适应度。具体地, 每个个体的基因型由指令组合成的前缀表达式形式表示, 因此, 借助栈结构遍历该表达式便可以执行这段代码。执行之后会生成一段由点构成的路径, 通过计算路径总长度计算个体的适应度。生成路径后会对路径进行碰撞检测, 如果路线与障碍物发生碰撞, 则会将路径总长度值设置为“无穷大”。个体适应度越低表示所对应的路径规划程序规划出的路径更优。得到种群中每个个体的适应度后, 使用轮盘选择策略选出优秀的个体, 并将其复制到下一代。

每一代的种群会进行适应度计算、交叉、变异、选择操作，进化多代后，最终得到最优个体，将该个体的基因型解析为对应的代码段，执行该代码段能规划出一条优质路径。

路径规划程序自动生成系统流程如图 2 所示。

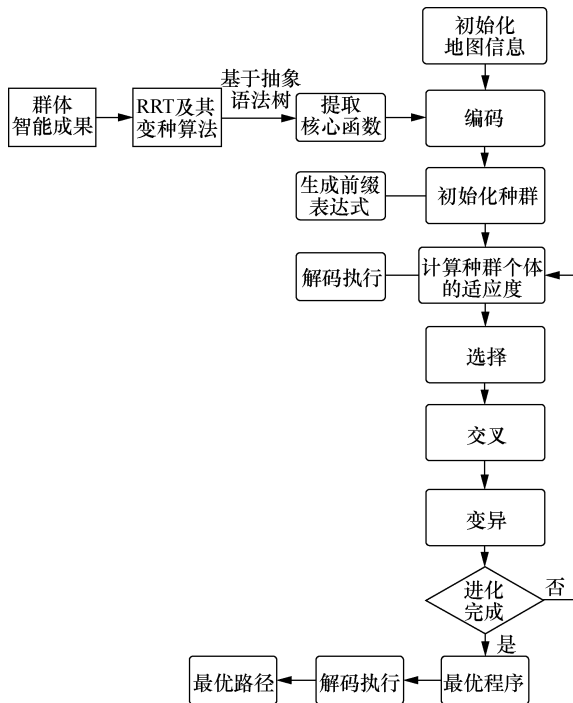


图 2 路径规划程序自动生成系统流程

## 2.1 初始化地图

本文设计的路径规划程序自动生成系统需要学习 RRT 路径规划算法及其改进算法的特性，探究 RRT 路径规划算法、RRT-Star 路径规划算法、RRT-Star-Smart 路径规划算法对环境的适应性，因此需要预先获得完整的地图信息。本系统支持离散型和连续型两种二维地图形式。对于连续型地图形式，将地图转化成二值图像，以离散型地图形式处

理，通过判定地图中点的像素值来处理不规则图形的碰撞问题。为了进行路径的规划，还需要预先在地图上设定起始点和目标点。

## 2.2 遗传编程编码指令

路径规划程序自动生成系统基于遗传编程算法，需要先确定编码方式和基因型的表示形式。本系统提取 RRT 路径规划算法及其变种算法的关键步骤包括随机采样、扩展节点、重布线、路径优化等。将这些关键步骤封装成函数，并作为基因编程指令。为每个指令设定一个随机概率范围，用于随机生成基因型。根据每个指令函数对应的参数个数确定树中该节点的子树个数，然后递归生成前缀表达式作为个体的基因型，逻辑上为树结构。

设计所得的基因编码指令见表 1。

基于前缀表达式的基因型示例序列如下：

funcAddNodeNearest      funcAddNodeRewire  
funcAddNodeNearest 112 24

前缀表达式指令对应的树状结构如图 3 所示。

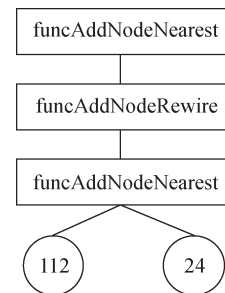


图 3 前缀表达式指令对应的树状结构

## 2.3 基因组与世代

初始时，依据设计的编码方式，随机地递归生成一系列前缀表达式。其中，递归时，如果随机生成的节点是操作数，则将其作为叶子节点，递归结束；如果生成的节点是操作符，即封装好

表 1

基因编码指令

| 指令                   | 简化符号 | 概率         | 操作                                          | 参数    |
|----------------------|------|------------|---------------------------------------------|-------|
| funcRand             | ?    | [0, 0.1)   | 随机采样一个点                                     | 无     |
| funcAddNodeNearest   | -    | [0.1, 0.4) | 将距离采样点最近的树中节点作为新扩展节点的父节点                    | 采样点坐标 |
| funcAddNodeRewire    | *    | [0.4, 0.7) | 以采样点为圆心画圆，将圆范围内到起点最近的树中节点作为新扩展节点的父节点，并进行重布线 | 采样点坐标 |
| funGoalRatePath      | =    | [0.7, 0.8) | 调整采样点趋于目标点概率                                | 无     |
| funcPathOptimization | \$   | [0.8, 0.9) | 从叶子节点开始，寻找能避开障碍物直接到达的父节点并与之相连，化曲为直          | 无     |
| 实数                   | 无    | [0.9, 1)   | 生成节点坐标                                      | 无     |

的函数, 则根据该函数所需的参数个数继续递归以生成该节点的子树。将生成的前缀表达式作为初始种群中个体的基因型。根据设定的种群大小, 为每个个体随机初始化生成基因型, 形成基因组, 构成初始种群。

## 2.4 适应度函数

遗传编程通过设计适应度函数来计算个体的适应度, 以评估每个个体的表现。本文设计的路径规划程序自动生成系统旨在生成路径规划程序, 因此, 将程序规划出的路径的质量作为指标来设计适应度函数。个体的适应度越低代表生成的程序表现越好, 规划出的路径更优。在计算种群中个体的适应度时, 会对路径进行碰撞检测, 如果路径与障碍物发生了碰撞, 则将适应度 (即路径总长度) 设置为“无穷大”, 以保证路径的可行性。

## 2.5 遗传操作

本系统的遗传操作包括交叉、变异、选择<sup>[22-23]</sup>。由于本系统将基于树的遗传编程算法作为基础框架, 因此交叉操作采用的策略是交换两个父代树的子树, 变异操作则是更改树中的节点。

将个体基因型的前缀表达式转换成树的结构, 对树进行遍历, 依赖变异率交换两棵树的某段子树, 实际上是交换两个前缀表达式中的某个序列段。由于交换子树时, 会按选定节点的子树个数进行同等数目的匹配, 因此与交换后生成的前缀表达式序列对应的程序仍具可执行性。交叉操作示例如图4所示。

类似地, 变异操作通过将个体基因型的前缀表达式形式转化为树的结构, 从根节点开始对树进行遍历, 依据变异率, 根据当前选中节点的子树个数,

与对应参数个数的编码指令进行匹配, 确保程序的可执行性。变异操作示例如图5所示。

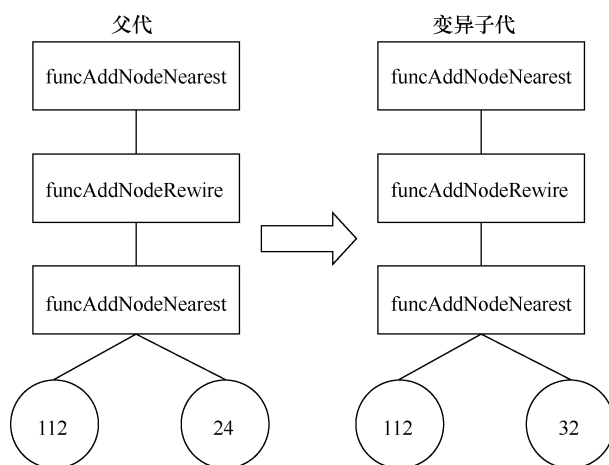


图5 变异操作示例

本系统的选择操作采用轮盘选择策略, 首先依据适应度函数计算出种群中所有个体的适应度, 将每个个体的适应度与总适应度的比例作为每个个体能被复制到下一代的概率。依据概率计算累积概率, 之后在 $[0, 1]$ 选择一个随机数, 则满足累积概率大于或等于随机数, 并且前一个个体的累积概率小于随机值的个体将被选择, 并被复制到下一代。

每一个世代中, 种群通过交叉、变异、选择操作提升种群的多样性, 生成有轻度随机扰动的个体, 以增大搜索空间, 产生表现效果可能比父代更好的个体。

## 3 实验设置与结果分析

本系统最终可以生成新的路径规划程序, 并获得规划出的路径信息。系统支持离散型和连续

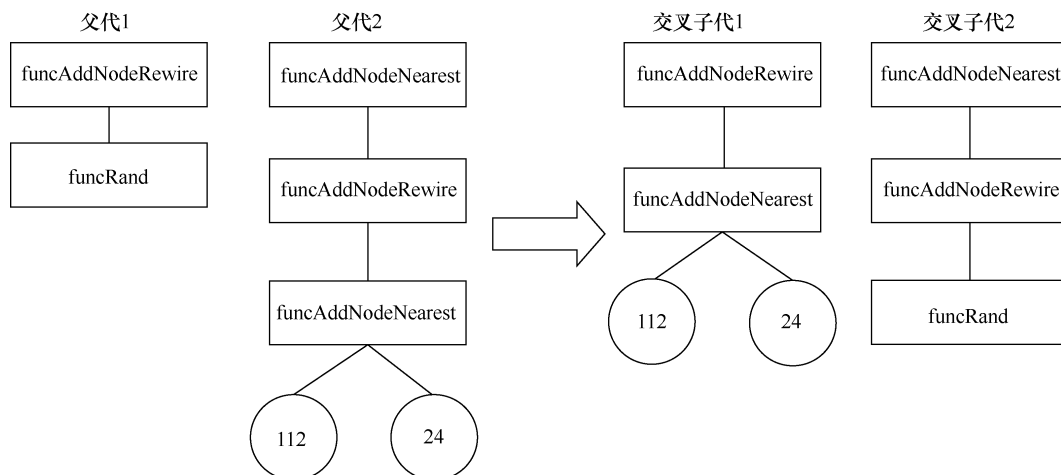


图4 交叉操作示例



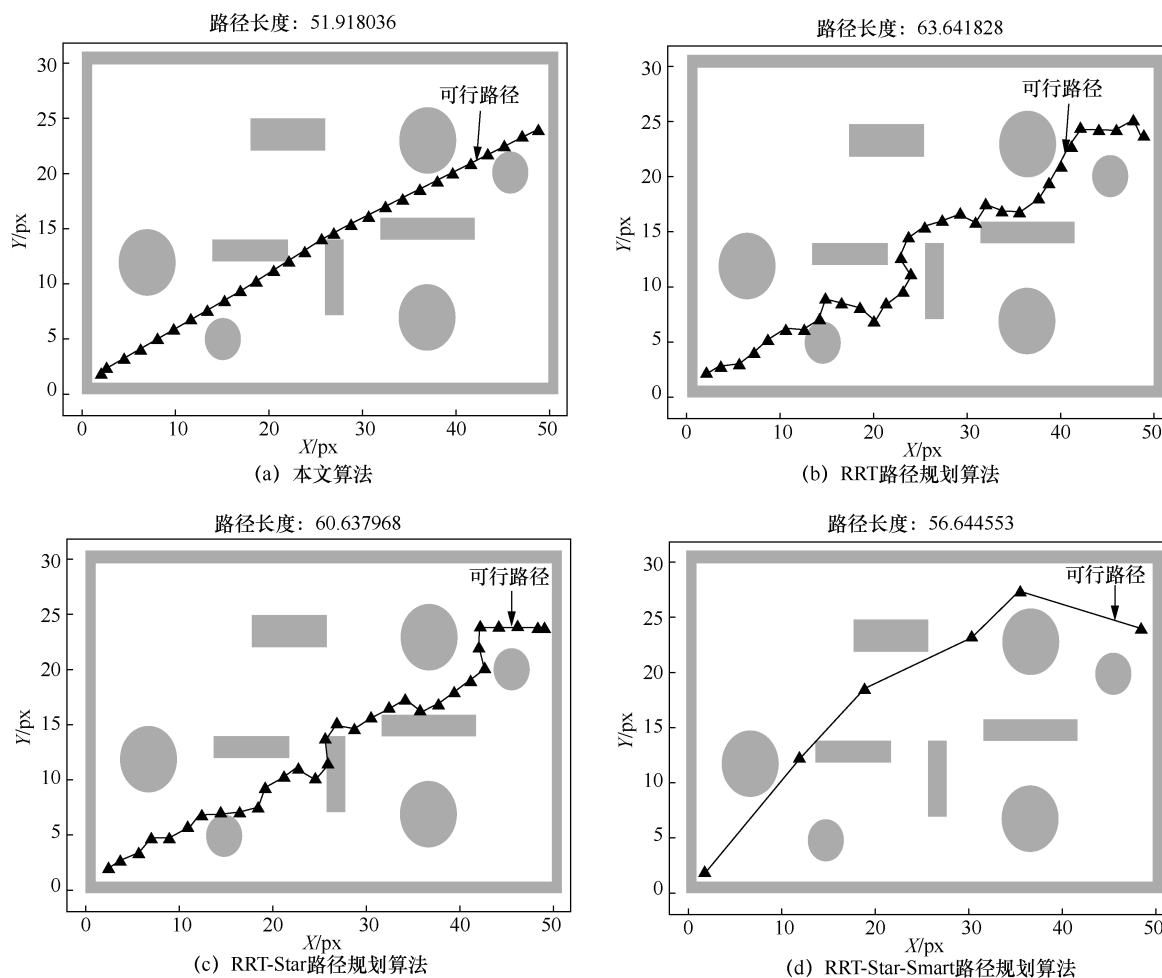


图8 对比实验

表2 4个算法规划出的路径长度及规划用时

| 算法                    | 路径长度/px          | 规划用时/s          |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| RRT 路径规划算法            | 63.641828        | 0.012558        |
| RRT-Star 路径规划算法       | 60.637968        | 10.381315       |
| RRT-Star-Smart 路径规划算法 | 56.644553        | 1.467539        |
| 本文算法                  | <b>51.918036</b> | <b>0.001001</b> |

#### 4 结束语

路径规划算法应用广泛，很多高效的路径规划算法已被提出并被广泛地应用到各个领域。不同路径规划算法有各自的优缺点，使用的范围也不相同。选择一个合适的路径规划算法进行规划能达到事半功倍的效果。基于此，本文提出了一种路径规划程序自动生成系统。该系统学习了群体智能成果RRT路径规划算法及其变种算法的优缺点，取长补短，以遗传编程为框架，提取多个

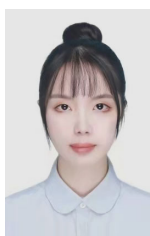
路径规划程序的关键代码段作为遗传编程的编码指令，重新组合生成一种新的、更适应当前环境的路径规划算法。经过遗传编程一代又一代的进化，最终得到能规划出优质路径的路径规划程序。经实验验证，本文提出的路径规划程序自动生成系统在二维地图环境下能较好地规划出从起始点到目标点的可行路径。经过对比实验，在同一地图环境下，该系统生成的新的路径规划程序规划出的路径质量略优于RRT路径规划算法、RRT-Star路径规划算法和RRT-Star-Smart路径规划算法。本文方法虽然取得了较好的结果，但对于更加复杂的地图环境，系统需要进化更多代才能找到较优个体，训练时间激增，系统还有很大的优化空间。此外，目前本系统提取出的路径规划程序关键代码段数量较少，遗传编程中设计的编程指令较少，仍存在部分与RRT等路径规划算法相同的不足之处，具有局限性。可以多学习不同类型的路径规划算法，增大搜索空间，创造更

多可能性，这也是未来的一个研究方向。

## 参考文献：

- [1] LA VALLE S M. Motion planning[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(2): 108-118.
- [2] ZHANG H Y, LIN W M, CHEN A X. Path planning for the mobile robot: a review[J]. Symmetry, 2018, 10(10): 450.
- [3] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random trees: progress and prospects[M]. [S.l.:s.n.], 2001.
- [4] PÉREZ-HIGUERAS N, CABALLERO F, MERINO L. Learning robot navigation behaviors by demonstration using a RRT\* planner[C]//Proceedings of the International Conference on Social Robotics. [S.l.:s.n.], 2016.
- [5] ISLAM F, NASIR J, MALIK U, et al. RRT-Smart: rapid convergence implementation of RRT towards optimal solution[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1651-1656.
- [6] SAKAMOTO E, IBA H. Inferring a system of differential equations for a gene regulatory network by using genetic programming[C]//Proceedings of 2001 Congress on Evolutionary Computation. [S.l.:s.n.], 2001.
- [7] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2002, 24(4):656-667.
- [8] LE G C, NGUYEN T, FORREST S, et al. GenProg: a generic method for automatic software repair[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2012, 38(1): 54-72.
- [9] KHAN J A, LIU L, WEN L, et al. Crowd intelligence in requirements engineering: current status and future directions[C]//Proceedings of the International Working Conference on requirements Engineering: Foundation for Software Quality. Cham: Springer, 2019: 245-261.
- [10] LIU J R, JI W. Crowd intelligence evolution based on complex network[J]. International Journal of Crowd Science, 2021, 5(3): 281-292.
- [11] CUI B J, LI J S, GUO T, et al. Code comparison system based on abstract syntax tree[C]//Proceedings of 2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology. Piscataway: IEEE Press, 2010: 668-673.
- [12] FERREIRA C. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems[J]. Complex Systems, 2001, 13(2): 87-129.
- [13] YAN Z C, BI Y, XUE B, et al. Automatically extracting features using genetic programming for low-quality fish image classification[C]//Proceedings of 2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 2021: 2015-2022.
- [14] AHVANOOEY M T, LI Q M, WU M, et al. A survey of genetic programming and its applications[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems. 2019, 13(14): 1765-1794.
- [15] OLTEAN M. Solving classification problems using traceless genetic programming[J]. arXiv preprint, 2021, arXiv:2111.14790.
- [16] KANG J G, JUNG J W. Post triangular rewiring method for shorter RRT robot path planning[J]. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, 2021, 21(3): 213-221.
- [17] KALA R. Rapidly exploring random graphs: motion planning of multiple mobile robots[J]. Advanced Robotics, 2013, 27(14): 1113-1122.
- [18] ZHANG L W, LIN Z B, WANG J, et al. Rapidly-exploring random trees multi-robot map exploration under optimization framework[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 131: 103565.
- [19] GE Q Y, LI A J, LI S H, et al. Improved bidirectional RRT path planning method for smart vehicle[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021: 6669728.
- [20] SUDHAKARA P, GANAPATHY V, SUNDARAN K. Optimal trajectory planning based on bidirectional spline-RRT\* for wheeled mobile robot[C]//Proceedings of 2017 3rd International Conference on Sensing, Signal Processing and Security. Piscataway: IEEE Press, 2017: 65-68.
- [21] TAK H T, PARK C G, LEE S C. Improvement of RRT\*-Smart algorithm for optimal path planning and application of the algorithm in 2 & 3-dimension environment[J]. Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 2019, 27(2): 1-8.
- [22] HASSANAT A, ALMOHAMMADI K, ALKAFaweEN E, et al. Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms—a review with a new dynamic approach[J]. Information, 2019, 10(12): 390.
- [23] DENG W, XU J J, SONG Y J, et al. Differential evolution algorithm with wavelet basis function and optimal mutation strategy for complex optimization problem[J]. Applied Soft Computing, 2021, 100: 106724.

## [作者简介]



王雨倩（1999—），女，北京航空航天大学计算机学院硕士生，主要研究方向为无人系统智能算法。



丁嵘（1975—），男，博士，北京航空航天大学人工智能研究院博士生导师，主要研究方向为软件工程、自主无人系统、群体智能等。