

基于视野范围和遗传算法的三维地形路径规划

贺 娇, 谭代伦

西华师范大学 数学与信息学院, 四川 南充 637000

摘 要:对三维地形路径规划,为克服地形的不确定性,借鉴自然界生物视觉系统的工作机制,提出了路径规划中的视野范围概念,借助空间几何投影方法实现了视野范围的构建,建立了视野范围的检测算法,并融合到遗传算法的种群初始化和变异策略中,使得遗传算法的种群个体(行走路径)总在视野范围内,从而自然避开地形障碍,确保了路径的可行性,不必再设计修复算子,降低了算法复杂度。仿真实验以融合视野范围的遗传算法和蚁群算法分别求解,结果表明前者求得的最优路径长度平均能降低18.7%,且求解性能和效率更高。这为仿生学与现代群智能算法的结合提供了一些新的思路和方法。

关键词:三维地形;路径规划;几何投影;视野范围;遗传算法

文献标志码:A **中图分类号:**TP391 **doi:**10.3778/j.issn.1002-8331.2103-0071

Three-Dimensional Terrain Path Planning Based on Sight Range and Genetic Algorithm

HE Jiao, TAN Dailun

School of Mathematics and Information, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China

Abstract: For 3D terrain path planning, in order to overcome the uncertainty of terrain and learn from the working mechanism of biological vision system in nature, the concept of sight range in path planning is proposed. With the help of spatial geometric projection method, the construction of sight range is realized, and the detection algorithm of sight range is established, which is integrated into the population initialization and mutation strategy of genetic algorithm. So that the individual population of genetic algorithm(walking path) is always in the sight range, so as to avoid the terrain obstacles naturally, ensure the feasibility of the path, do not need to design repair operator, reduce the complexity of the algorithm. The simulation results show that the optimal path length obtained by the former can be reduced by 18.7% on average, and the solution performance and efficiency are higher. This provides some new ideas and methods for the combination of bionics and modern swarm intelligence algorithm.

Key words: three-dimensional terrain; path planning; geometric projection; sight range; genetic algorithm

路径规划是智能技术中的热点研究问题,已在众多领域有所突破并初步得以应用,其中包括:无人机航迹规划^[1-3]、移动机器人路径规划^[4-6]、自主水下航行器路径规划^[7-8]、景点旅游路径规划^[9-10]、城市交通出行路径规划^[11-12]等。路径规划研究在二维平面环境中取得了一定的成效,但随着生活的发展变化,考虑到实际操作角度,更多时候的路径规划需要在特定的三维场景下完成,故如何优化三维环境中最短路径的研究是具有重要意义且十分必要的。

三维空间环境中的路径规划是NP难问题,由于三

维地形路径规划问题中的空间复杂度以及地形不确定性等因素往往使得规划效果不佳,故如何对其进行更好的规划是极具挑战的。近几年,国内外专家学者做了很多的研究。郝燕玲等^[13]采用栅格法划分三维空间中XY平面,以针对路径的表示,只要求得到每一栅格里的最大地形高度,而不对实际地形环境做任何处理;禹建丽^[14]、何光勤等^[15]引入碰撞罚函数,结合对各个障碍物的神经网络定义各路径点的碰撞罚函数,对各路径点的碰撞罚函数求和得到整条路径罚函数,以此规避不可行路径;李玉齐^[16]提出一种立方体栅格的方法来

基金项目:四川省教育厅自然科学基金重点项目(15ZA0152);四川省科技计划(2019YFG0299);四川省教育厅重点教改项目(JG2018-688);西华师范大学英才基金(17YC387);西华师范大学重点教改项目(JGXMZD1825)。

作者简介:贺娇(1997—),女,硕士,研究方向为优化理论与应用,E-mail:1515069278@qq.com;谭代伦(1971—),通信作者,男,硕士,教授,研究方向为优化理论与应用。

收稿日期:2021-03-04 **修回日期:**2021-05-20 **文章编号:**1002-8331(2021)15-0279-07

描述三维空间障碍物,通过判断空间线与面的相交与否则确定是否与障碍物发生碰撞,从而搜索三维避障路径;袁建华等^[17]在三维空间中定义长方体障碍物,通过UAV自身传感器建立可视区域,以当前位置为中心分别产生10个同心球体,从中随机选取代价系数最小的节点组成子路径,结合滚动策略探知周围环境信息完成避障。

综合已有文献的研究成果,一种更接近人工智能的思路是借鉴自然界生物视觉系统的工作机制,为路径规划也定义某种视野范围,以更有效地克服由于地形不确定性所带来的干扰和影响,使路径规划过程总是沿着视野范围内行走,从而确保路径总是可行的,以此避开三维地形障碍,并将这种机制结合到遗传算法中,通过实验仿真求解三维地形路径规划问题,取得了较好效果。

1 三维地形与视野范围

目前,三维空间环境建模通常采用栅格法,即将空间的三个维度进行等距划分,形成空间中的网格块,并把它们看作是路径规划中的节点,以此构造路径。而三维空间环境的路径规划主要在三维地形的表面上行进,因此只需对经度和纬度这两个维度作网格化,第三个维度可直接取地形表面的海拔高度,不需作网格化处理。本文选取文献[18-20]中的一种随机三维地图,如图1。

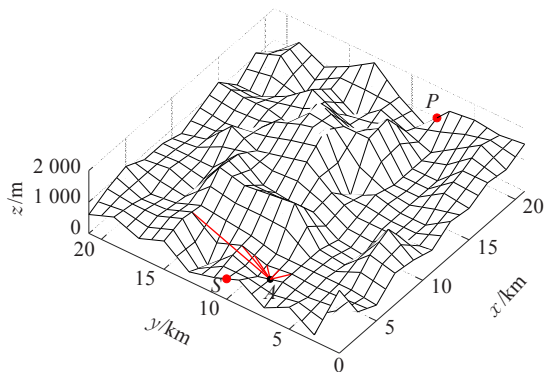


图1 三维地形与视野范围

Fig.1 3D terrain and sight range

图中三维地形的范围为21 km×21 km×2 km,对XY平面进行网格化,每个网格的长度和宽度均为单位1。点S为路径起点,点P为路径终点,点A为路径上任意一点。网格化后,连续变化的三维地形表面被简化为一个个的空间四边形,这些空间四边形在XY平面上的投影对应于每一个正方形网格。

自然界中,大部分生物依靠自身的视觉系统在三维地形表面上行走,每一次向前行进的距离,往往都是在根据视觉系统检测到的可行走范围内^[21]。基于这种生物视觉仿生学原理^[22],本文将三维地形上从某点出发检

测到的可行走范围定义为视野范围。在图1中,从点A发出的红色线段,是它能直接到达的下一网格点的行走路径,这些线段及其端点即可看作是从A点出发沿x轴正方向前进的视野范围。

设从路径起点S到路径终点P需经过n个中间节点,记中间节点集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{n-1}, v_n\}$,那么在三维路径规划中建立以总路径长度D为优化目标的数学模型如下:

$$\min_{v_i \in V} D = d_{v_S v_1} + \sum_{i=1}^{n-1} d_{v_i v_{i+1}} + d_{v_n v_P}$$

其中, $d_{v_i v_{i+1}}$ 表示节点 v_i 到 v_{i+1} 的两点间距离。

2 视野范围的构建与检测

2.1 视野范围的构建

在三维地形路径规划中,检测出视野范围对形成一条完全可行的路径是非常关键的。对图1的点A,其视野范围可抽象为如图2所示的空间几何图形。

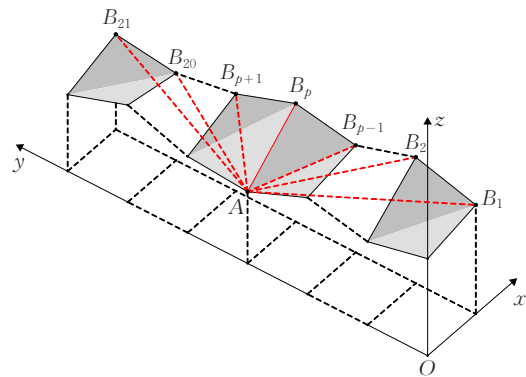
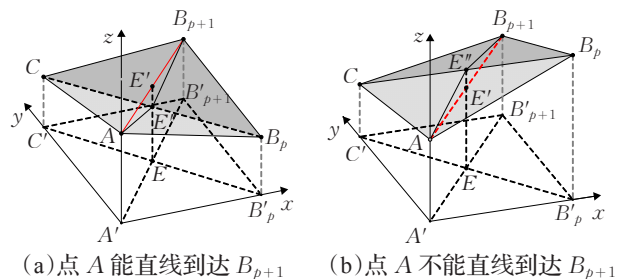


图2 点A的视野范围示意图

Fig.2 Spatial geometry of sight range

在图2中, $\{B_1, B_2, \dots, B_{p-1}, B_p, B_{p+1}, \dots, B_{20}, B_{21}\}$ 为从A点出发,向x轴正方向前进时所有可能的路径节点。可以看到,从点A可以直线到达点 B_p ,而其余的节点,能否以直线方式到达则需要检测和判断。

若从A点出发,要到达的下一个网格点是同一个网格内的对角顶点,如图3。此时可能有两种情形:一种是对角线 $B_p C$ 的空间位置比 AB_{p+1} 低,在实际三维地形中相当于“山谷”,如图3(a),此时从点A能以直线方



(a)点A能直线到达 B_{p+1} (b)点A不能直线到达 B_{p+1}

图3 一个网格内的视野范围

Fig.3 Sight range in a grid

式到达点 B_{p+1} , 于是 B_{p+1} 在点 A 的视野范围内; 另一种情形是对角线 $B_p C$ 的空间位置比 AB_{p+1} 高, 在实际三维地形中相当于“山脊”, 如图 3(b), 此时从点 A 不能以直线方式到达点 B_{p+1} , 即 $B_p C$ 构成了地形障碍, 则 B_{p+1} 点就不在点 A 的视野范围内。

由空间几何投影知识可知, 要判断空间直线段 AB_{p+1} 和 $B_p C$ 的位置关系, 可以先找到它们在 XY 平面上投影线的交点 E , 过 E 点作 XY 平面的垂线, 与 AB_{p+1} 和 $B_p C$ 分别交于点 E' 和 E'' , 比较 E' 和 E'' 的第三维坐标 $z_{E'}$ 和 $z_{E''}$ 大小, 即可判断出 AB_{p+1} 和 $B_p C$ 的空间高低关系。

通常网格四个顶点 A 、 B_p 、 B_{p+1} 、 C 的三维坐标是已知的, 其对角线在 XY 平面上投影的交点 E 的三维坐标也是容易计算的, 则 $z_{E'}$ 和 $z_{E''}$ 可按下式进行计算:

$$z_{E'} = \min(z_A, z_{B_{p+1}}) + \frac{(x_{E'} - x_A)}{(x_{B_{p+1}} - x_A)} \times |z_{B_{p+1}} - z_A| \quad (1)$$

$$z_{E''} = \min(z_C, z_{B_p}) + \frac{(x_{E''} - x_C)}{(x_{B_p} - x_C)} \times |z_{B_p} - z_C| \quad (2)$$

若从 A 点出发, 要到达的下一个网格点 B_q 需要跨越多个网格, 则以 AB_p 为基准, 在点 A 左侧和右侧可能形成的视野范围投影图如图 4(a)、(b)所示。

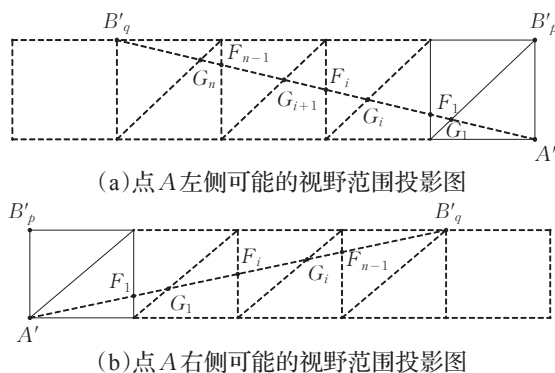


图 4 跨越多个网格时可能的视野范围

Fig.4 Possible sight range in multiple consecutive grids

对图 4(a), 可按以下公式计算 F_i, G_i 的坐标:

$$\begin{cases} x_{F_i} = x_{A'} + \frac{i}{n_{pq}}, i = 1, 2, \dots, n_{pq} - 1 \\ y_{F_i} = y_{A'} - i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{G_i} = x_{A'} + \frac{i}{n_{pq} - 1} \\ y_{G_i} = y_{A'} - \frac{n_{pq} \cdot i}{n_{pq} - 1}, i = 1, 2, \dots, n_{pq} - 2 \end{cases} \quad (4)$$

对图 4(b), 可按以下公式计算 F_i, G_i 的坐标:

$$\begin{cases} x_{F_i} = x_{A'} + \frac{i}{n_{pq}}, i = 1, 2, \dots, n_{pq} - 1 \\ y_{F_i} = y_{A'} + i \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{G_i} = x_{A'} + \frac{i}{n_{pq} + 1} \\ y_{G_i} = y_{A'} + \frac{n_{pq} \cdot i}{n_{pq} + 1}, i = 1, 2, \dots, n_{pq} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 视野范围的检测

利用式(1)~(6)可以检测出三维地形中从某点出发的视野范围。为记录检测结果, 定义如下 0-1 型变量:

$$T_{AB_i} = \begin{cases} 1, & \text{点 } B_i \text{ 属于点 } A \text{ 的视野范围} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 21$$

根据 3.1 节中视野范围构建过程, 对三维地形上某点 A 及对应的下一网格基准点 B_p , 点 A 的视野范围检测算法步骤为:

(1) 依次取点 $B_q \in \{B_1, \dots, B_{p-1}, B_{p+1}, \dots, B_{21}\}$, 计算投影点 B'_p 和 B'_q 之间的正方形网格个数 n_{pq} 。

(2) 按公式(3)、(4)或(5)、(6)计算投影线 $A'B'_q$ 与所跨越网格的边线和对角线所有交点 F_i, G_i 的坐标。

(3) 对所有交点 F_i, G_i , 按公式(1)计算其在 XY 平面上垂线与线段 AB_q 的交点 E' 的海拔高度 $z_{E'}$ 。

(4) 对所有交点 F_i, G_i , 按公式(2)计算其在 XY 平面上垂线与网格的边线或对角线的交点 E'' 的海拔高度 $z_{E''}$ 。

(5) 若 $z_{E'} \geq z_{E''}$, 则 $T_{AB_i} = 1$, 否则 $T_{AB_i} = 0$ 。

3 基于视野范围的遗传算法

三维路径规划是典型的组合优化问题, 其路径节点较多, 问题规模较大, 近年来在求解方法上更多地选择了现代群智能算法, 既能获得较高精度的近似最优解, 也能加快求解速度。在各种群智能算法中, 遗传算法的通用性、并行性、鲁棒性^[23]均较强, 已被成功应用于求解三维地形的路径规划。所提视野范围较好地解决了遗传算法求解三维地形的路径规划中回避地形障碍的问题, 从而不必设计修复算子对不可行路径进行处理。为此, 下面将结合视野范围机制对遗传算法进行设计。

3.1 编码方案

在遗传算法中, 编码方案是将问题的解空间转换为有利于遗传进化操作的基因编码。如图 1, 对给定的起点 S 和终点 P , 其沿地形行走的路径具有逐个网格依次前进的特点, 故只需对不确定的 y 坐标进行编码, 再利用 z 坐标判断是否避开地形障碍即可。

网格化后的 y 坐标是用自然数表示的, 因此采用不重复的自然数编码方案。对图 1, 每一个遗传个体的基因编码可记为:

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_{21}], y_i \in \{1, 2, \dots, 21\}$$

3.2 基于视野范围的种群初始化

遗传算法不能直接处理问题空间的参数, 需要将其

编码成为遗传空间的染色体。在三维地形路径规划中,由于存在地形障碍,所产生个体的基因(路径节点)很容易构成不可行路径。为此,引入视野范围机制进行检测和判断,可以很好解决这个问题。设种群规模为 M , 基因编码长度为 N , 则基于视野范围的种群初始化步骤为:

(1) 初始化一个 $M \times N$ 的空矩阵, 设置每一个体第一个基因编码为起点 S 的 y 坐标。

(2) 根据 2.2 节的视野范围检测算法, 搜索起点 S 的视野范围 $\{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1i}, \dots, v_{1k_1}\}$, 并在其中随机选取一个路径节点 v_{1i} , 将点 v_{1i} 的 y 坐标填入下一个基因编码。

(3) 以此类推, 直至选取的最后一个基因编码为终点 P 的 y 坐标。

上述初始化中, 路径的形成过程如图 5。

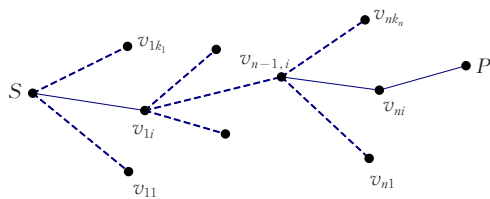


图5 基于视野范围的路径形成过程

Fig.5 Path formation process based on sight range

3.3 适应度函数

适应度函数用于评估和区分种群个体的优劣, 是进行遗传选择的依据^[24]。根据 3.2 节可知种群初始化方法所产生的种群个体都是可行路径, 因此个体的适应度可以直接取路径中相邻节点的欧氏距离之和, 即:

$$fit = \sum_{i=1}^{l-1} \left[\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \right] \quad (7)$$

经迭代计算后, 适应度最小的个体即为最短路径。

3.4 轮盘赌选择策略

轮盘赌策略是遗传算法的经典选择策略^[25], 首先将个体适应度 f_i 归一化并取倒数得到 f'_i ; 其次, 计算个体的适应度占比 $p_i = f'_i / (\sum f'_i)$ 以及累积概率 $P_i = \sum p_i$; 最后随机产生一个随机数 $rnd \in (0, 1)$, 选择满足 $P_{i-1} < rnd < P_i$ 中的第 i 个个体进入子代种群。

3.5 重合点片段交叉策略

遗传算法的交叉策略是将两个随机个体的部分基因进行交换, 从而生成新个体^[26]。为保证被交换基因(子路径)的有效性, 引入了一种重合点片段交叉策略: 在两个个体中查找出两个基因重合点(相同位置的基因相同), 将介于两个重合点之间的基因片段按交叉概率进行交换, 从而生成两个新的子代个体。

3.6 基于视野范围的变异策略

在遗传算法中, 变异策略有利于增加种群的多样性, 能够尽量避免算法过快陷入局部最优^[27]。采用片段基因变异方法, 即以给定的变异概率改变个体的部分

基因片段。考虑到基因变异后将会导致不可行路径的产生, 因此结合视野范围机制进行片段变异, 其主要步骤为:

(1) 随机产生两个不同的自然数 $R_1, R_2 \in (1, N)$, 且 $R_1 < R_2$ 。

(2) 对当前个体, 以第 R_1 个基因点所对应的节点为视野中心, 确定其视野范围, 并在其中随机选取一个节点, 取其 y 坐标作为下一个基因编码。

(3) 以此类推, 直至选取节点的 y 坐标为第 R_2 个基因所对应的节点。

例如, 有以下当前个体 Y_i , 随机生成两个不同的自然数为 $R_1 = 2, R_2 = 9$, 经变异得 Y'_i 。

$Y_i: 10 \underline{3} \parallel 8 \ 5 \ 11 \ 1 \ 10 \ 10 \parallel \underline{15} \ 3 \ 4$

$Y'_i: 10 \underline{3} \parallel 12 \ 11 \ 2 \ 6 \ 3 \ 11 \parallel \underline{15} \ 3 \ 4$

3.7 算法流程设计

综合上述设计, 基于视野范围的遗传算法流程图如图 6。

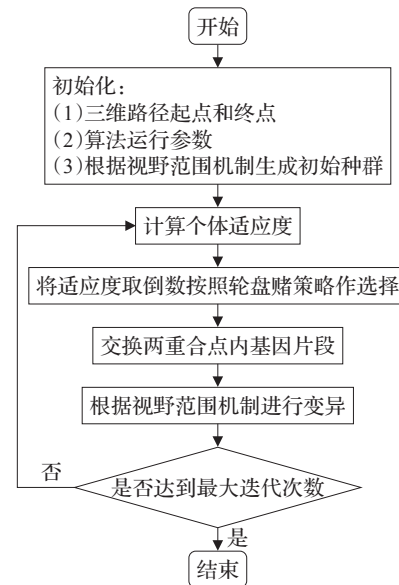


图6 基于视野范围的遗传算法流程图

Fig.6 Flow chart of genetic algorithm based on field of view

4 实验及仿真结果

近年来, 较多文献选用蚁群算法求解三维路径规划。为验证所提算法的有效性和求解性能, 对图 1 的三维地形图, 下面选取标准蚁群算法与本文算法分别进行求解。图 1 中, 路径起点为 $S(1, 10, 0.65)$, 路径终点为 $P(21, 8, 1)$ 。

硬软件环境为 AMD A8-4500M CPU/8 GB/Win7 系统和 Matlab R2018a。由于遗传算法的运行参数往往是通过先前经验或者反复的调试获得的, 故设置遗传算法的种群规模、迭代次数、交叉概率和变异概率分别为

100、100、0.8、0.3。

4.1 实验结果

按照图6的算法流程和上述算法参数编程,本文算法和标准蚁群算法求解的三维路径如图7所示。

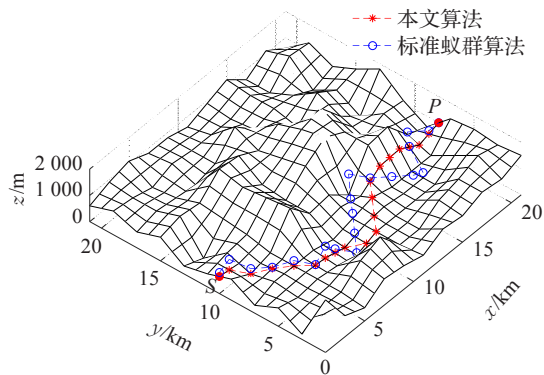


图7 两种算法求得的最优路径

Fig.7 Optimal path obtained by two algorithms

在图7中,蓝色路径为标准蚁群算法所求,路径长度为27.5 km,红色路径为所提算法所求,路径长度为23.5 km,结果明显更优。

为便于更好地观察图7中的两条路径,将两种算法求得的三维路径投影至XY平面,如图8。

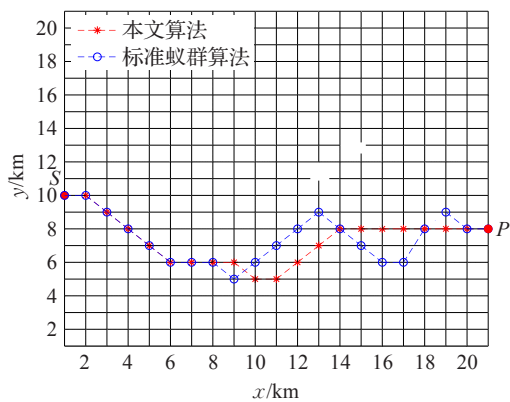


图8 三维最优路径在XY平面的投影

Fig.8 Projection of three dimensional optimal path in XY plane

结合图7和图8,可以看到,在路径的后半部分节点上,三维地形障碍较多、变化复杂,本文算法求得的最优路径更优于标准蚁群算法。

两种算法在求解三维地形最优路径时适应度的进化曲线如图9。在图9中,红色进化曲线下落更快,很快趋于平缓,最短路径长度取值更小,因此本文算法的寻优能力明显强于标准蚁群算法,收敛速度更快,所需迭代次数更少。

4.2 算法性能

为进一步测试本文算法求解三维路径规划问题的性能,降低由智能算法的随机导致的结果片面性,本文运用两种算法在相同实验环境中分别进行多次实验,统

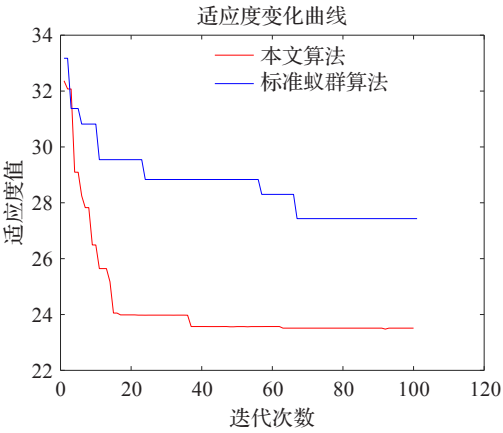


图9 两种算法的进化曲线

Fig.9 Evolution curve of two algorithms

计两种算法的运行结果,随机选取三组实验结果在路径长度与迭代速度上进行对比,如表1。

表1 两种算法求得的最优路径长度比较

Table 1 Comparison of optimal path length obtained by two algorithms

比较项	最优路径长度/km		降低百分比/%
	标准蚁群算法	本文算法	
实验1	27.433 1	23.477 2	14.4
实验2	28.239 8	22.716 1	19.5
实验3	28.164 2	21.907 0	22.2
均值	27.945 7	22.700 1	18.7

从表1可以看到,本文算法求解的最优路径长度均小于蚁群算法,且本文算法求得的最优路径长度比蚁群算法平均降低18.7%。说明本文提出的视野范围机制效果明显,一定程度上提高了选择下一路径节点的合理性,降低了路径长度。

记录随机选取的三次实验中两种算法求解时的进化曲线,统计两种算法寻得最优路径时的迭代次数,统计结果如表2所示。

表2 两种算法迭代速度比较

Table 2 Comparison of iterative speed of two algorithms

比较项	迭代次数	
	标准蚁群算法	本文算法
实验1	62	38
实验2	43	25
实验3	57	31

从表2可以看到,在三次随机实验中,本文算法均早于蚁群算法求得最优路径。说明本文提出的视野范围构建机制有效规避了不可行解的产生,明显提高了路径搜索效率,节省了寻优时间。

5 结束语

针对三维路径规划问题,本文模拟自然界生物的视

觉系统提出了一种视野范围机制,利用几何投影方法构建了任意节点视野范围,以此达到规避地形障碍的目的,从而寻得可行路径;将视野范围机制引入遗传算法,提出了一种基于视野范围的遗传算法,通过实验仿真求解三维地形路径规划问题,不断对种群规模个体进行迭代寻优。实验仿真结果表明视野范围机制求解三维地形路径规划问题具有良好的适用性,与蚁群算法的实验对比结果更加表明视野范围机制的路径规划效率较高。这对未来可移动智能设备更好地模拟自然界生物的各种实用功能提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 李昱奇,刘志乾,程凝怡,等.多约束条件下无人机航迹规划[J].计算机工程与应用,2021,57(4):225-230.
LI Y Q, LIU Z Q, CHENG N Y, et al. Path planning of UAV under multi-constraint conditions[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(4): 225-230.
- [2] 陈麒杰,晋玉强,韩露.无人机路径规划算法研究综述[J].飞航导弹,2020(5):54-58.
CHEN Q J, JIN Y Q, HAN L. Overview of UAV path planning algorithm[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 54-58.
- [3] REN X P, TAN L, SHI J Q, et al. Multi-target UAV path planning based on improved RRT algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1786(1).
- [4] 黄志清,李鼎鑫,王庆文.非平坦地形下移动机器人安全路径规划研究[J/OL]. 控制与决策: 1-9[2021-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1124.TP.20210104.1513.025.html>.
HUANG Z Q, LI D X, WANG Q W. Research on safe path planning of mobile robot in uneven terrain[J]. Control and Decision: 1-9[2021-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1124.TP.20210104.1513.025.html>.
- [5] 余文凯,章政,金震,等.多目的地自主移动机器人的路径规划[J].计算机工程与设计,2020,41(10):2934-2941.
YU W K, ZHANG Z, JIN Z, et al. Autonomous mobile robots path planning for multi-destination[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(10): 2934-2941.
- [6] LI Z Q, LIU X, DUAN L S, et al. An improved hybrid genetic algorithm for holes machining path optimization using helical milling operation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1798(1).
- [7] 郭银景,孟庆良,孔芳,等.AUV路径规划算法研究现状与展望[J].计算机科学与探索,2020,14(12):1981-1994.
GUO Y J, MENG Q L, KONG F, et al. Research status and prospect of AUV path planning algorithms[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(12): 1981-1994.
- [8] 赵苗,高永琪,吴笛霄,等.复杂海战场环境下AUV全局路径规划方法[J].国防科技大学学报,2021,43(1):41-48.
ZHAO M, GAO Y Q, WU D X, et al. AUV global path planning method in complex sea battle field environment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 41-48.
- [9] 方苏杰,张宇航,方成刚.基于旅行费用约束的景点及路径动态规划研究[J].计算机应用与软件,2018,35(12):329-333.
FANG S J, ZHANG Y H, FANG C G. Dynamic planning of scenic spots and tour routes[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(12): 329-333.
- [10] 徐书扬,潘华铮,王海江.基于蚁群算法的旅游路线优化方案[J].软件导刊,2020,19(9):89-92.
XU S Y, PAN H Z, WANG H J. Research on tourism route planning based on ant colony algorithm[J]. Software Guide, 2020, 19(9): 89-92.
- [11] 刘思嘉,童向荣.基于强化学习的城市交通路径规划[J].计算机应用,2021,41(1):185-190.
LIU S J, TONG X R. Urban traffic path planning based on reinforcement learning[J]. Computer Applications, 2021, 41(1): 185-190.
- [12] 杜茂,杨林,金悦,等.基于交通时空特征的车辆全局路径规划算法[J].汽车安全与节能学报,2021,12(1):52-61.
DU M, YANG L, JIN Y, et al. Vehicle global path planning algorithm based on spatiotemporal characteristics of traffic[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(1): 52-61.
- [13] 郝燕玲,张京娟.基于遗传算法的AUV三维海底路径规划[J].中国工程科学,2003(11):56-60.
HAO Y L, ZHANG J J. AUV path planning in 3D seabed environment using genetic algorithm[J]. Engineering Science, 2003(11): 56-60.
- [14] 禹建丽,程思雅,孙增圻,等.一种移动机器人三维路径规划优化算法[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):471-477.
YU J L, CHENG S Y, SUN Z C, et al. An optimal algorithm of 3D path planning for mobile robots[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(2): 471-477.
- [15] 何光勤,朱一飞,张才然.基于遗传算法的无人机三维航迹规划研究[J].价值工程,2020,39(7):215-218.
HE G Q, ZHU Y F, ZHANG C R. Research of 3D flight path planning of UAV based on genetic algorithm[J]. Value Engineering, 2020, 39(7): 215-218.
- [16] 李玉齐.基于A*与势场法机械臂三维避障路径规划[J].农业装备与车辆工程,2018,56(12):62-66.
LI Y Q. 3D obstacle avoidance path planning for manipulator based on A* Mixed with potential field method[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018,

- 56(12):62-66.
- [17] 袁建华,李尚.无人机三维路径规划及避障方法[J].信息与控制,2021,50(1):95-101.
- YUAN J H,LI S.UAV 3D path planning and obstacle avoidance method[J].Information and Control,2021,50(1):95-101.
- [18] 陈志军,曾燕.基于模糊神经网络和遗传算法的机器人三维路径规划[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(1):93-99.
- CHEN Z J,ZENG Z.The three-dimensional path planning of robots based on fuzzy neural network and genetic algorithm[J].Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition,2018,35(1):93-99.
- [19] 周兰凤,钱伟杰,曹国刚,等.基于三维地形的路径规划算法研究[J].计算机应用与软件,2018,35(8):275-278.
- ZHOU L F,QIAN W J,CAO G G,et al.Research on path planning algorithm based on 3D terrain[J].Computer Applications and Software,2018,35(8):275-278.
- [20] 陈超,张莉.基于改进蚁群算法的三维路径规划[J].计算机工程与应用,2019,55(20):192-196.
- CHEN C,ZHANG L.Three-dimensional path planning based on improved ant colony algorithm[J].Computer Engineering and Applications,2019,55(20):192-196.
- [21] 张天驿.基于视觉注意机制的移动机器人目标跟踪研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- ZHANG T Y.Study on target tracking algorithm for mobile robot based on visual attention mechanism[D].Kunming: Kunming University of Science and Technology,2016.
- [22] 曹淼.基于视觉信息的仿生机器鼠运动规划策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- CAO M.Research on the motion planning strategy of a vision based bionic robot-rat[D].Harbin:Harbin University of Technology,2018.
- [23] 李少波,宋启松,李志昂,等.遗传算法在机器人路径规划中的研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(2):423-431.
- LI S B,SONG Q S,LI Z A,et al.Review of genetic algorithm in robot path planning[J].Science Technology and Engineering,2020,20(2):423-431.
- [24] 黄书召,田军委,乔路,等.基于改进遗传算法的无人机路径规划[J].计算机应用,2021,41(2):390-397.
- HUANG S Z,TIAN J W,QIAO L,et al.Unmanned aerial vehicle path planning based on improved genetic algorithm[J].Journal of Computer Applications,2021,41(2):390-397.
- [25] GOKULNATH C B,SHANTHARAJAH S P.An optimized feature selection based on genetic approach and support vector machine for heart disease[J].Cluster Computing,2019,22(6).
- [26] 刘庆,王洋,李星,等.基因池操作遗传算法的应用层组播路由优化[J].计算机工程与应用,2019,55(21):142-150.
- LIU Q,WANG Y,LI X,et al.Gene-pool based genetic algorithm for optimizing application layer multicast[J].Computer Engineering and Applications,2019,55(21):142-150.
- [27] 李敏,黄敏,程智锋,等.遗传算法在路径规划上的应用[J].计算机系统应用,2020,29(8):255-260.
- LI M,HUANG M,CHENG Z F,et al.Application of genetic algorithm in path planning[J].Computer Systems & Applications,2020,29(8):255-260.