

基于遗传算法的码垛机器人路径规划应用

郭玥, 李潇雯

(山西工商学院 计算机信息工程学院, 太原 030006)

摘要: **目的** 为了改进传统遗传算法在码垛机器人路径规划中可能出现的局部陷阱和过早收敛问题, 以及机器人的能耗和路线平滑性问题, 提出一种改进的遗传算法机器人路径规划方法。**方法** 针对传统遗传算法存在的问题, 分别对种群初始化、适应度函数、选择算子、交叉算子、变异算子的算法和方式进行调整和改进, 对优秀算法进行融合。针对基本遗传算法主要着重于路径最短, 从而忽视了机器人的能耗及路径平滑性等问题, 设计一种综合考虑距离和转弯次数控制的适应度函数, 最后将改进的算法应用于码垛机器人的路径规划中。**结果** 仿真结果表明, 相较于基本遗传算法, 提出的算法搜索到的路径质量更高, 不仅距离更短, 同时转弯次数远远小于其他算法, 路径更为平滑, 验证了该算法的有效性。**结论** 基于该算法的码垛机器人路径在兼顾距离最优的同时, 路线更加平滑。由于减少了转向次数, 机器人的能耗更低, 同时仿真结果表明, 该算法的实时性也较好。

关键词: 码垛机器人; 遗传算法; 路径规划; 适应度函数

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)21-0167-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.024

Path Planning Application of Palletizing Robot Based on Genetic Algorithms

GUO Yue, LI Xiao-wen

(Department of Computer Information Engineering, Shanxi Technology and Business College, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an improved genetic algorithm for robot path planning, in order to improve the local traps and premature convergence of the traditional genetic algorithm in the path planning of palletizing robot, as well as the energy consumption and path smoothness of the robot. Firstly, aiming at the problems of traditional genetic algorithm, the algorithms and methods of population initialization, fitness function, selection operator, crossover operator and mutation operator were adjusted and improved, and the excellent algorithms were fused. Aiming at the problem that the basic genetic algorithm mainly focused on the shortest path and thus ignored the energy consumption and path smoothness of the robot, a fitness function which took into full account the control of distance and turning times was proposed. Finally, the improved algorithm was applied to the path planning of the palletizing robot. The simulation results showed that, compared with the basic genetic algorithm, the proposed algorithm could find better path quality. Not only the distance was shorter, but also the turning times were much less than other algorithms, and the path was smoother, which proved the effectiveness of the algorithm. The path of palletizing robot based on the proposed algorithm is smoother while taking into account the optimal distance. Because of the reduction of turning times, the energy consumption of the robot is lower. At the same time, the simulation results show that the real-time performance of the algorithm is better.

收稿日期: 2019-06-28

基金项目: 山西省教育科学“十三五”规划项目(GH-16166)

作者简介: 郭玥(1984-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为嵌入式系统开发以及自动化控制。

KEY WORDS: palletizing robot; genetic algorithms; path planning; fitness function

码垛机器人是随着物流自动化技术领域的发展而出现的一门新兴技术,是一种应用了计算机控制、信息技术等高新技术学科的自动化智能设备,由于它能够无视生产环境限制,极大提高生产效率,因此被广泛应用于搬运、仓储、包装等生产流水线,在现代化企业自动化生产中起到极其重要的作用。

包装码垛机器人的作用是将包装物体从一个区域运送到另一区域,并将其精确摆放整齐,因此它是包装流水线上非常重要的一个自动化环节,也是关键装备之一。为了使码垛机器人能够在复杂环境中——特别是在复杂障碍环境下自主完成相应的工作,一个重要的核心问题就是路径规划问题^[1-2]。路径规划的主要任务就是让包装码垛机器人在工作环境中,从起点到终点自动实现搜索一条安全无碰撞且较优的可行路径。

针对移动机器人路径规划,众多学者从不同路径和角度进行了研究。1985年,Khatib首先将人工势场用于机器人路径规划^[3],此后模糊算法^[4]、粒子群算法^[5]、神经网络^[6]以及遗传算法^[7]等逐渐地应用到路径规划中,并且取得了较好的效果。在众多算法中,遗传算法由于其具有全局搜索能力以及鲁棒性等优点,成了学者们的研究热点。申晓宁等^[8]为了提高遗传算法的收敛速度,提出了将随机方法和启发式方法相结合的多目标遗传算法。2012年Tuncer等^[9]提出了一种新的变异方法,并将其应用在机器人路径规划中。2013年Qu Hong等^[10]在求解多机器人全局路径规划中,提出了一种基于协进化机制的改进遗传算法。Imen Chaari^[11]在2014年提出了一种混合算法,该算法有效提高了机器人全局路径规划质量。孙波等^[12]在遗传算法中引入模拟退火算法,提高了全局搜索能力。易欣等^[13]为了避免机器人运动规划中可能出现的局部陷阱和过早收敛问题,提出了一种改进的元启发式的自适应遗传算法。

尽管遗传算法具有很强的全局搜索能力,但在应用于机器人路径规划时也有很多不足,如收敛速度较慢、容易陷入局部最优解等。影响遗传算法的因素主要有环境模型的建立,初始种群的生成、选择、交叉,

变异算子参数的选择设定等。为了解决传统遗传算法存在的进化速度慢、易早熟收敛等问题,文中针对影响遗传算法的因素设计一种综合考虑了距离、避障因素的适应度函数,同时对基本遗传算法中的如选择算子、交叉算子、变异算子等关键步骤进行了调整变化,吸收了较为优秀有效的方法并进行融合,最后将改进算法应用于码垛机器人路径规划。

1 环境建模

在包装码垛机器人的路径规划中,算法的目标是在机器人的可活动物理空间中,得到一条能安全无碰撞从起点到达终点的路径,并且使得获得的路径是最优的。同时还应该考虑算法的搜索速度能够满足实时要求。为了让机器人能够理解,需要将物理空间转换为算法能够执行的抽象空间,因此首要任务是建立环境模型。

目前主流的机器人路径规划模型大都采用栅格模型^[14],整个工作空间被划分为多个大小相同的网格,同时包装码垛机器人被简化为一个质点。为了描述二维网格地图模型,障碍物用数字“1”标记,而码垛机器人的可行区域用数字“0”标记来标记,见图1。

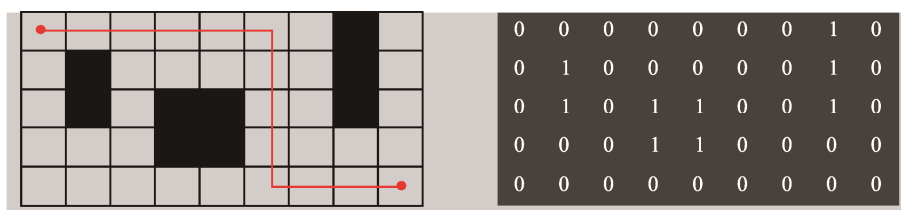
在图1a中,机器人环境由2D矩阵表示,其中网格中的每个位置(x,y)具有2个可能的值:0表示空闲单元,1表示占用单元(图1b)。一条合适的规划路径是从起点到目标点的一组单元格取值为0的网格组合。

为了更为方便地标识栅格和减少内存空间占用,将单元格的坐标转换为序号法标识。即从整个网格的左下角开始,按照行的顺序,对单元格依次标识序号1,2...,以此类推,直到整个网格结束,见图2。

栅格单元序号S和坐标法(x,y)的转换关系为:

$$\begin{cases} x = \text{mod}(S - 1, n) + 0.5 \\ y = n + 0.5 - \text{ceil}(S / n) \end{cases} \quad (1)$$

式中:mod()函数为求余运算;ceil()函数为向上取整运算。



a 栅格模型

b 栅格矩阵

图1 栅格环境建模

Fig.1 Grid environment modeling

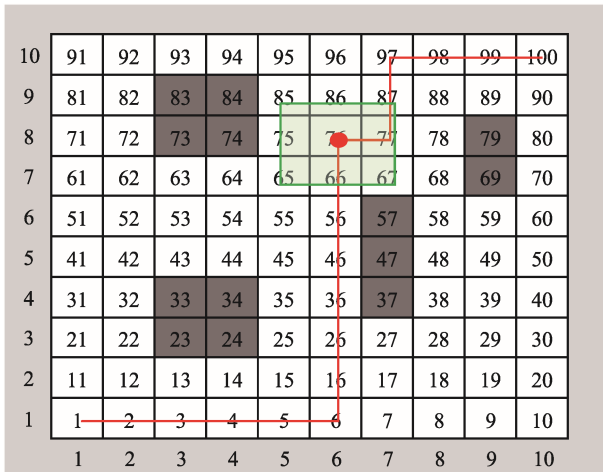


图 2 环境地图序号标定
Fig.2 Environmental map number calibration

2 基于改进遗传算法的路径规划方法

2.1 路径编码

路径个体的编码指的是对码垛机器人从起点到终点的一条安全无碰撞的路径的表达描述方式(见图 2)。路径编码的方式对遗传算法的存储要求、搜索空间以及收敛速度都有较大的影响,常用的编码方法有二进制编码、浮点数编码或符号编码等。采用图 2 所示的序号进行编码,设一条无碰撞的安全路径经过的栅格序号依次为(1 2 3 4 5 6 16 26 36 46 56 66 77 87 97 98 99 100),则该序列即为一条路径的编码(不允许出现重复的序号)。由于路径的长度是可变的,因此个体编码长度也是可变的。采用序号编码的方式优点在于关系清晰,占用存储空间小,也无需进行解码操作。

2.2 初始种群的生成

遗传算法开始执行并经过搜索得到最佳路径时,对种群的初始化是一个非常重要的步骤,因为不同的初始化策略会影响到遗传算法的效率和结果。传统遗传算法的种群初始化是通过随机方式确定的,这种方式虽然简单,但是不利于生成路径的优秀解,甚至很大的可能得到一个不可行解,且不适合实际应用。

学者们针对随机初始化种群所带来的问题,提出了诸多种群初始化方法,如关键单元、基于清晰度的路线图方法(CBRM)、随机游走、人工势场和贪婪法则等。采用文献[15]提出的人工势场法初始化种群方法。该方法的思想是通过在目标位置构造引力势场,在障碍物的周围构造斥力势场,机器人的移动方向受引力和斥力形成的合力影响而改变。

2.3 适应度函数设计

一旦创建了初始种群,遗传算法就必须通过使用

适应度函数来衡量每条路径个体的质量,该函数为每条路径分配一个反映其优劣的适应度值。判断一条路径是否优秀最少要满足 2 个条件:该路径是否安全无碰撞;该路径是否最短。

定义合适的适应度函数是一个至关重要的步骤,因为遗传算法要依据此函数进行遗传和变异。传统适应度函数一般取路径总长度的倒数,综合考虑了路径的安全性和路径距离以及机器人转向次数(影响路径的平滑性)等因素,设计了一种新的适应度函数:

$$f(p) = \frac{1}{w \cdot L(p) + w_s \cdot S(p)} - E \quad (2)$$

式中:设路径为 P , $L(p)$ 为路径的长度, $S(p)$ 是衡量路径安全性的一个值; w 是 $L(p)$ 的权重, w_s 是 $S(p)$ 的权重, E 是路径平滑性的衡量值。

$L(p)$ 为路径的欧氏距离,设机器人从 $A(x_i, y_i)$ 点移动到 $B(x_j, y_j)$ 点,则 A 和 B 两点间的欧氏距离为:

$$L(p) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3)$$

由此可知,一条路径的长度是若干个两点间的距离的和:

$$L(p) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (4)$$

$S(p)$ 为衡量整条路径安全性的度量值。对于机器人当前所处的栅格 $p(x_i, y_i)$,其安全判定值为 s_i ,判定范围为当前单元格的 8 个邻接单元格是否存在障碍物(见图 2),如果存在障碍物,则取 1,否则取 0。

$$S(p) = \sum_{i=1}^{N-1} s_i \quad s_i = 1 \text{ or } 0 \quad (5)$$

E 用于判断整条路径的平滑性, e 为机器人在当前栅格 $p(x_i, y_i)$ 的取值。每当机器人在执行了一次转向操作,就给它+1,反之则+0:

$$E = \sum_{i=1}^N e \quad e = 0 \text{ or } 1 \quad (6)$$

2.4 选择算子

选择算子是一种遗传算子,是模拟大自然中种群在选择压力下的演化,用于选择那些具有最佳健康值的染色体进行交叉,以便产生下一代。选择的策略有精英保留策略^[16]、锦标赛选择(TOS)、轮盘赌选择(RWS)、随机通用抽样(SUS)、线性秩选择(LRS)、指数秩选择(ERS)、截断选择(TRS)^[17]等。

采用了结合精英保留策略和截断选择(TRS) 2 种方法的选择策略,精英保留策略用于高压选择,保证具有优秀表现的个体基因被遗传下去,而截断选择(TRS)属于低压选择,可以遍历搜索空间并给予弱染色体以机会,弥补精英保留策略易于陷入早熟的缺点,使得种群的演化更为多样性。

2.5 交叉算子

选择算子在选择出个体后将其用于交叉。交叉就是将 2 个个体的染色体中的基因进行交换以产生下一代。交叉的思想是新一代个体在继承了父母的优秀基因后，会表现出比上一代更好的特征。交叉从基因点位的角度看有单点交叉、多点交叉、基于位置交叉等，有时候为了保护个体的可行性，要进行特殊的交叉。交叉的方式对于遗传算法产生新一代个体具有重要的决定作用，当父代的 2 个个体编码相似度很高时，很难产生新的下一代个体。特别是在种群进化后期，大量的个体基因编码趋近于相同，此时的交叉操作大部分都是无效的，对于算法的收敛造成影响。

由于在选择操作时分别采用了精英保留策略和截断选择策略，因此会得到 2 个群体：一个是由精英保留策略选择出来的具有高适应度的个体集合 A；另一个是由截断选择策略得到的含有弱适应度的个体的集合 B。在进行交叉操作时，父代的 2 个个体是从种群 A 和 B 随机各选取一个进行的，这样可以最大保证种群的多样性和避免陷入“早熟”。父代 2 个个体交叉结束后，可以得到 2 个子代个体。重复执行选取和交叉操作，直到当代种群数目达到期望值，并按照文献[18]的方式进行变异操作；对子代个体按照适应度排序，选取当代种群中适应度最大的个体适应值作为阈值，将父代种群 A 中适应值大于该阈值的个体替换当代种群中排序最后的个体；对当代种群重新按照精英保留和截断选择 2 种策略生成种群 A 和 B，重复上述步骤，直到算法收敛于最优结果。

采用单点交叉方式，为了保证路径的连续性，交叉原则是在父代的个体编码中选取相同序号点处进行交叉（起点 S 和终点 E 除外）。如果进行交叉操作的 2 个父代编码中相同序号的点位有多个，则随机选取一个进行交叉；如果不存在相同序号的点位，则不进行交叉。当交叉结束后，如果产生的新个体中有重复序号，则对重复编码段进行删除。

如，设 2 个待交叉的父代个体 P1 和 P2 基因编码如下：

```
P1 : ( S  21  22  42  62  63  64  65  85
86  106  107  108  128  E )
P2 : ( S  2   3  23  43  63  83  84  85
65  66  67  87  107  127  E )
```

可以看出 P1 和 P2 中除去起点 S 和终点 E 之外，具有相同序号的点位置有 3 个，交叉时随机选取 3 个中的 1 个进行，不妨假设选取序号 85 为交叉点，交叉后所得的子代个体 C1 和 C2 为：

```
C1 : ( S  21  22  42  62  63  64  65  85
65  66  67  87  107  127  E )
C2 : ( S  2   3  23  43  63  83  84  85
```

```
86  106  107  108  128  E )
```

其中 C1 个体产生了回路，应对重复编码段（65 85）进行删除。

2.6 变异操作

变异操作是通过改变个体中染色体基因，用于改善多样性和预防算法的早熟收敛。变异的方式通常以概率 P_m 随机选择 2 个不连续的基因片段，然后按照路径最短原则和不重复原则搜索到起点和终点位置，形成一个完整的个体。但随机选择方式经常会产生无效路径，因此，采用文献[16]提出的变异算子。

3 实验仿真结果分析

为了对设计的路径规划方法进行验证，建立如图 2 所示的 20×20 栅格环境模型，并与基本遗传算法进行比较。设码垛机器人的起点序号为 1，终点序号为 400，并设置若干障碍。算法运行仿真环境为 Matlab 2015b，系统为 Win10。在仿真中，基本遗传算法初始种群采用随机生成方式，选择算子采用轮盘赌方式，种群规模为 80，进化迭代次数为 150，交叉概率 $p_c=0.65$ ，变异概率 $p_m=0.01$ 。提出的改进算法相关参数设定如下：种群规模为 80，进化迭代次数为 150，初始算法的交叉概率 $p_c=0.82$ ，初始算法的变异概率 $p_m=0.01$ （经实验验证，在该参数下，算法有较好的效果）。实验结果见图 3—4。

从图 3 可以看出，相比基本遗传算法，提出的算法可以搜索到更短的路径。由图 4 中 2 种算法的最优收敛曲线可知，提出的算法能够比较快地收敛到最优结果，且最优结果的路径长度远远优于基本遗传算法。改进后算法可以有效防止出现局部陷阱和过早收敛，分析其原因如下所述。

1) 种群初始化采用了文献[15]提出的改进人工势场法的方法。通过引入填平势场，使得势场函数能够跳出局部极小点，避免局部陷阱。

2) 设计的适应度函数考虑了路径平滑性，也即机器人转向影响因子 E 。该因子考虑了机器人当前所处位置周围 8 领域栅格是否存在障碍物，由式（2）可知，在其 8 领域栅格范围内存在障碍物越多， E 值越大，适应度函数取值越小。该因子可以有效避免局部陷阱。

3) 采取了 2 种选择算子，分别是精英保留和截断选择。精英选择的优点是保证迄今为止的最优个体不会被破坏，但另一方面其全局搜索能力不强，易陷入早熟。引入截断选择可以增加算法的全局搜索能力，同时扩大种群多样性，可以有效避免早熟现象产生。

由图 4 可知，文中算法得到的路径结果更为合理，质量更高，这是由于提出的适应度函数考虑了码

堆机器人的转向次数，这对于减少机器人的运动能耗，提高路径的平滑性，具有重要作用。改进遗传算

法在不同仿真模拟环境下与基本遗传算法的平均转向次数和总迭代次数对比见图 5。

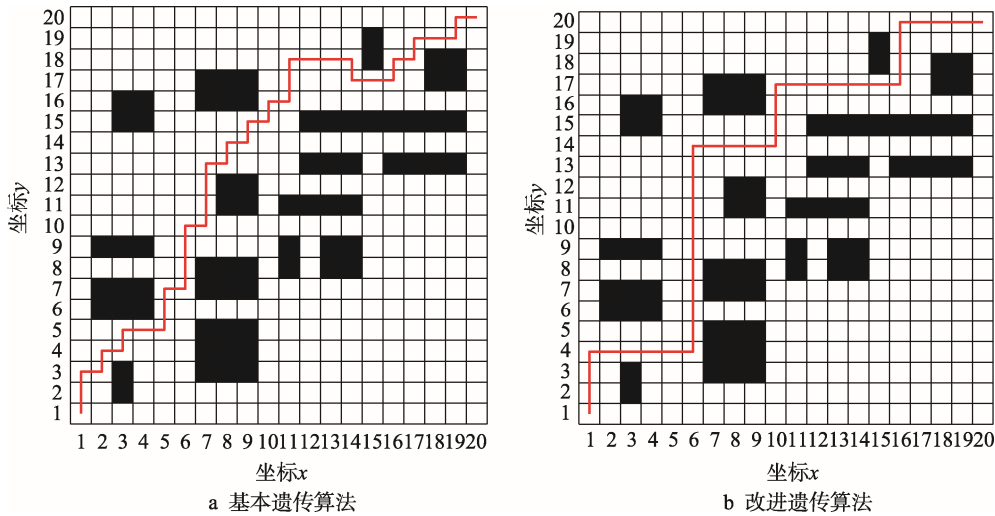


图 3 实验路径仿真

Fig.3 Simulation of experimental paths

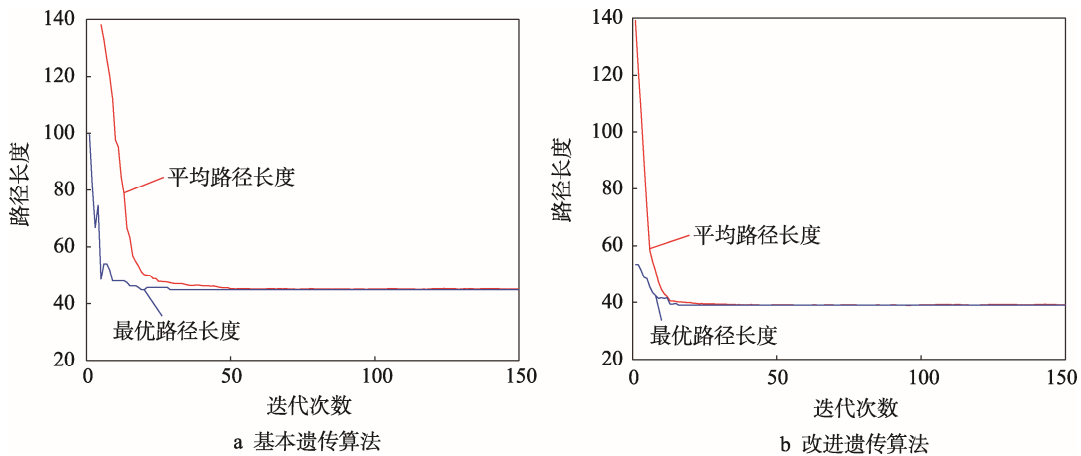


图 4 2 种算法的适应度函数及迭代次数对比

Fig.4 Comparison of fitness functions and iterations of two algorithms

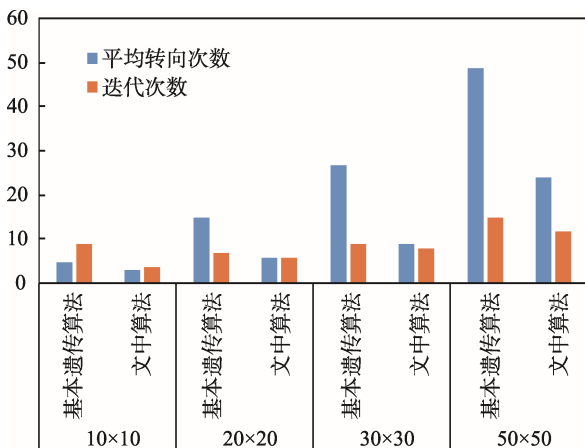


图 5 2 种算法在不同环境下的转向数与迭代次数对比

Fig.5 Comparison of turning times and iterations of two algorithms in different environments

4 结语

提出了一种基于遗传算法的包装码垛机器人路径规划的改进算法，针对基本遗传算法，特别是对适应度函数进行了重新设计。该函数综合考虑了码垛机器人路径规划时的距离、避障因素，有效减少了机器人的运动能效损耗，提高了路径的平滑性。为了验证算法，将其应用于不同规模的环境中并与基本遗传算法进行了比较，结果表明所提出的遗传算法是可行的。该方法得到的路径相比基本算法，平均转弯次数和平均迭代次数更为理想，所得到的路径更为平滑合理，质量更高。

参考文献：

[1] ZHANG L, MIN H, WEI H, et al. Global Path Planning

- for Mobile Robot Based on A* Algorithm and Genetic Algorithm[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2012.
- [2] SARIFF N B, BUNIYAMIN N. Comparative Study of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm Performances for Robot Path Planning in Global Static Environments of Different Complexities[C]// Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA), 2009 IEEE International Symposium on IEEE, 2010.
- [3] KHATIB O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[C]// Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE, 2003.
- [4] MBEDE J B, HUANG X, WANG M. Fuzzy Motion Planning Among Dynamic Obstacles Using Artificial Potential Fields for Robot Manipulators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 32(1): 61—72.
- [5] 李擎, 徐银梅, 张德政, 等. 基于粒子群算法的移动机器人全局路径规划策略[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(3): 397—402.
- LI Qing, XU Yin-mei, ZHANG De-zheng, et al. Global Path Planning Method for Mobile Robots Based on the Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 397—402.
- [6] 禹建丽, KROUMOV V, 成久洋之. 机器人路径规划算法及其应用[J]. 数学季刊(英文), 2002, 17(3): 98—104.
- YU Jian-li, KROUMOV V, HIROYUKI N. Path Planning Algorithm for Car-like Robot and Its Application[J]. Chinese Quarterly Journal of Mathematics, 2002, 17(3): 98—104.
- [7] KOK K Y, RAJENDRAN P. Differential-Evolution Control Parameter Optimization for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning[J]. PLOS ONE, 2016, 11.
- [8] 申晓宁, 郭毓, 陈庆伟, 等. 多目标遗传算法在机器人路径规划中的应用[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 659—663.
- SHEN Xiao-ning, GUO Yu, CHEN Qing-wei, et al. Application of Multi-Objective Optimization Genetic Algorithm to Robot Path Planning[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(6): 659—663.
- [9] TUNCER A, YILDIRIM M. Dynamic Path Planning of Mobile Robots With Improved Genetic Algorithm[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(6): 1564—1572.
- [10] QU H, XING K, ALEXANDER T. An Improved Genetic Algorithm With Co-Evolutionary Strategy for Global Path Planning of Multiple Mobile Robots [J]. Neurocomputing, 2013, 120(10): 509—517.
- [11] CHAARI I, KOUBAA A, TRIGUI S, et al. Smart PATH: An Efficient Hybrid ACO-GA Algorithm for Solving the Global Path Planning Problem of Mobile Robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11: 1.
- [12] 孙波, 姜平, 周根荣, 等. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2019.
- SUN Bo, JIANG Ping, ZHOU Gen-rong, et al. Application of Improved Genetic Algorithm in Path Planning of Mobile Robots[J]. Computer Engineering and Applications, 2019.
- [13] 易欣, 郭武士, 赵丽. 利用自适应选择算子结合遗传算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机应用研究, 2019, 37(6).
- YI Xin, GUO Wu-shi, ZHAO Li. Robot Motion Planning Based on Adaptive Selection Operator Combined With Genetic Algorithm[J]. Application Research of Computers, 2019, 37(6).
- [14] 梁嘉俊, 曾碧, 何元烈. 基于改进势场栅格法的清洁机器人路径规划算法研究[J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(4): 30—36.
- LIANG Jia-jun, ZENG Bi, HE Yuan-lie. Research on Path Planning Algorithm for Cleaning Robot Based on Improved Potential Field Grid Method[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2016, 33(4): 30—36.
- [15] 陈尔奎, 吴梅花. 基于改进遗传算法和改进人工势场法的复杂环境下移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 84—90.
- CHEN Er-kui, WU Mei-hua. The Path Planning of Mobile Robots Based on the Improved Genetic Algorithm and the Improved Artificial Potential Field Algorithm in Complex Environment[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 79—85.
- [16] DEJONG K. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems[D]. University of Michigan, 1975.
- [17] TAN K C, LEE T H, KHOR E F. Evolutionary Algorithms With Dynamic Population Size and Local Exploration for Multi-objective Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(6): 565—588.
- [18] TUNCER A, YILDIRIM M. Dynamic Path Planning of Mobile Robots With Improved Genetic Algorithm[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(6): 1564—1572.