

基于改进智能水滴算法的移动机器人路径规划

李登峰, 杨 曦

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为提高移动机器人路径规划算法的精度,提出一种基于改进智能水滴算法的移动机器人路径规划算法。首先,以跑步机运动模型中仿人机器人的运行为对象,对其模型进行研究,然后利用栅格模型对移动机器人运行区域及行进方向进行模型构建,得到机器人行进的8个方向模型,同时对移动机器人路径规划问题进行建模,得到移动机器人的相应约束优化问题模型;其次,介绍智能水滴算法,并将其引入路径规划模型进行模型优化,随后,采用邻域扰动策略对智能水滴进化过程进行优化改进,增加了路径规划成功率,实现了算法性能的进一步提升;最后,进行了标准测试函数以及机器人路径规划算例上的实验仿真,结果表明该算法提高了收敛速度和精度,优化了移动机器人路径规划结果。

关键词:智能水滴算法;移动机器人;路径规划;栅格模型;优化算法

中图分类号:TP391;TP18

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)12-0049-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.12.009

Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Intelligent Water Drop Algorithm

LI Deng-feng, YANG Xi

(School of Electrical and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To improve the accuracy of path planning algorithm for mobile robots, a path planning algorithm for mobile robots based on improved intelligent water drop algorithm is proposed. Firstly, the running model of the robot in the treadmill motion model is taken as the object to be studied, and then the grid model is used to model the running region and the traveling direction of the mobile robot to obtain eight moving direction model of the robot. At the same time, the mobile robot path planning is modeled and the corresponding constrained optimization problem model is given. Secondly, the intelligent water droplets algorithm is introduced into the path planning model for model optimization, and the neighborhood perturbation strategy is used to optimize and improve the intelligent water droplets evolution process. The path planning success rate is increased, which further improves the performance of the algorithm. Finally, the simulation of standard test function and the robot path planning example is carried out, which shows that this algorithm improves the convergence speed and precision and optimizes the path planning of mobile robot.

Key words: intelligent water drop algorithm; mobile robot; path planning; grid model; optimization algorithm

0 引言

近年来,智能优化算法得到了广泛的研究和应用,取得了很好的效果。智能水滴算法(intelligent water drop, IWD)是一种新的仿生优化算法,其主要设计思路来自于对河流中水滴的运行观察和模拟,实际环境中如果不存在障碍,水流将径直流向目标即为最佳流动路径^[1-2]。但是实际上河流中存在大量的障碍物,但是水滴的运行过程能够采取最合理方式绕过障碍物,实现路径的最佳选取,因此智能水滴算法就是模拟

水滴流动行为,构建了类似于水滴运行过程的避障算法,从而查找到目标位置的最优路径^[3]。与经典的水滴种群、差分进化、粒子群等算法相比,智能水滴算法的避障原理与机器人的路径规划中的障碍物规避问题具有很多相似点,因此采用智能水滴算法进行机器人路径的最优规划具有原理上的优势。

但是在实际研究中,IWD算法是一种新兴的优化算法,利用IWD算法进行机器人路径规划层面的研究不多,但是可以借鉴其在车辆等系统路径规划中的研

收稿日期:2019-01-06

修回日期:2019-05-07

网络出版时间:2019-06-27

基金项目:陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-05-03-02)

作者简介:李登峰(1964-),男,硕士,副教授,研究方向为嵌入式系统、新能源汽车、智能机器人;杨曦(1993-),女,硕士研究生,研究方向为智能机器人。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190627.1111.078.html>

究成果。例如,文献[4-6]中分别采用传统的 IWD 算法进行实际问题的研究,有效解决了车辆路径优化问题,并对优化系统的开发进行了研究和设计;文献[7]从改善算法进化种群多样性的层面对 IWD 算法进行研究,并将其应用到车辆路径优化问题中,实现了算法优化效果的提升,获得更为理想的车辆路径规划效果;文献[8]从多目标优化角度对车辆路径优化问题进行研究,并结合 IWD 算法进行了多目标优化算法的研究,实现了更为理想的车辆路径规划效果。尽管 IWD 算法应用在路径规划研究中已有成功经验^[9-11],但是整体研究仍然较少,特别是 IWD 算法应用到机器人路径规划中的研究成果更少。

文中主要是针对机器人路径规划问题,利用 IWD 算法进行规划设计,同时为了提高路径规划的效果,对 IWD 算法进行了同步改进,利用邻域水滴个体的扰动搜索实现进化过程的改进,实现了更为理想的机器人路径规划结果。

1 机器人路径规划问题

1.1 模型描述

首先对仿人机器人运行模型进行研究^[12],其运行结构示意图见图 1。

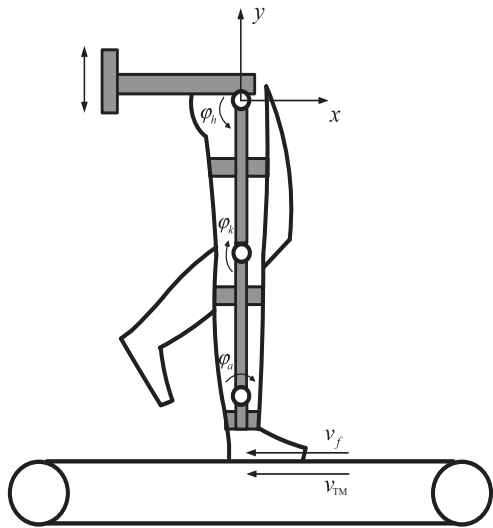


图 1 仿人机器人运行模型

图 1 中,角度参数 φ_h 、 φ_k 、 φ_a 分别关系着腿髋、膝部以及脚踝关节的行进轨迹,并将其设定成采用时间变量的运行函数。同时设定脚踝关节、小腿部以及大腿部与机器人脚底位置上的部件长度分别是 l_a 、 l_k 、 l_h 。基于图 1 的仿人机器人运行模型,可构建数理模型形式为:

$$\begin{aligned} x[\varphi_h(t), \varphi_k(t), \varphi_a(t)] &= l_h \sin[\varphi_h(t)] + \\ & l_k \sin[\varphi_h(t) + \varphi_k(t)] + l_a \sin[\varphi_h(t) + \\ & \varphi_k(t) + \varphi_a(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

对模型 1 所示仿人机器人运行模型进行求导,可

得机器人脚部位置的速度参数 v_f :

$$v_f = \frac{d}{dx} x(\varphi_h(t), \varphi_k(t), \varphi_a(t)) \quad (2)$$

仿人机器人在运行过程中,机器人脚部与地面的接触点是 $x(t)$,假定仿人机器人匀速运行,且其速度为 v_{TM} ,则可得接触点 $x(t)$ 的计算模型是:

$$x(t) = \int_{t_0}^t v_{TM} dt + x_0 \quad (3)$$

其中,参数 t_0 是仿人机器人脚跟部与地面接触的时刻;参数 x_0 是仿人机器人脚跟部与地面接触的初始位置。

在机器人行动过程中,如果式 2、式 3 对于运行过程的计算不存在误差,则可得理想模型 $v_f = v_{TM}$,而接触点位置上的摩擦力能够产生保持机器人运动的动力。否则,如果计算存在误差,则可得模型 $v_f \neq v_{TM}$,进而导致仿人机器人脚位置与真实的平移距离之间存在一定偏差,该偏差值可采用积分形式表示为:

$$e(t) = \int_{t_0}^t (v_f - v_{TM}) dt + e_0 \quad (4)$$

其中,偏移项 $e_0 = x(\varphi(t_0)) - x(t_0)$,参数项 e_0 是仿人机器人脚部的初始点位置。如果模型 4 计算得到的误差数值过大,则会导致仿人机器人脚部与接触地面之间产生过大的摩擦力,不利于运行流畅性的提高。因此,在仿人机器人运行轨迹优化过程中需要考虑机器人运行速度的合理性。

1.2 栅格目标模型构建

将机器人运行区域构建成为栅格模型,同时将机器人的运行环境建立成数字地图模型形式,模型中的所有环境信息均可表示成序号的索引形式,常采用两种方法进行:序号表示方法以及坐标表示方法。栅格地图模型中,可利用其所处的二维平面的位置坐标 (x_g, y_g) 进行栅格的表示,其与序号表示方法可实现相互转换,转换模型形式为:

$$\begin{cases} x_g = \text{mod}(\text{Num}, N) \\ y_g = \text{Num}/N + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,参数 Num 表示栅格地图模型的序号编码;参数 N 表示栅格地图模型的列参数取值。

在所构建的栅格地图模型中,为了简化计算方法,提高机器人控制响应能力,机器人的运行并不是随意的,将其限定在 8 个方向,见图 2。

图 2 中,机器人运行的 8 个方向是上下左右,此外还有 45 度角的四个方向,分别是左前(F-L)、左(L)、右(R)、左后(B-L)、右后(B-R)、右前(F-R)、后(B)、前(F)。在构建上述栅格地图模型以后,利用数据传感器可对机器人运行的环境信息进行检测,并将障碍物位置进行标记,对于不存在障碍物的位置设定

成自有区域,采取膨化方式对栅格地图模型中的障碍物进行处理,并将机器人模型进行简化,得到其运行的点模型。然后对机器人的运行路径进行规划,路径可采用集合形式进行表示:

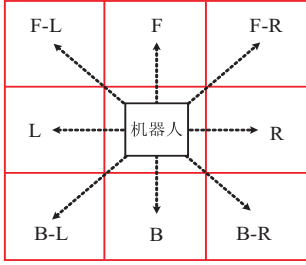


图 2 机器人行进方向

$$\text{Path}_i = \{S, P_1, \dots, P_i, \dots, P_k, G\} \quad (6)$$

其中,参数 S 是机器人运行的起点位置;参数 G 是机器人运行的终点位置;参数 P_i 是机器人运行的一系列中间点位置,可表示为 $P_i = (x_{gi}, y_{gi})$ 或者 $P_i = \text{Num}_i$,则可得地图坐标转换模型形式为:

$$\begin{cases} x_g = \text{int}(x/w) \cdot w + \text{int}(w/2) \\ y_g = \text{int}(y/w) \cdot w + \text{int}(w/2) \end{cases} \quad (7)$$

其中,参数 (x, y) 是机器人运行区域所处的二维坐标系;参数 w 是机器人运行区域栅格模型结构的分辨率,由此可得机器人运行路径长度为:

$$\text{PL}_i = \|P_1 - S\| + \sum_{i=1}^{i=k-1} \|P_{i+1} - P_i\| + \|G - P_k\| \quad (8)$$

基于以上模型定义,机器人运行过程中的路径规划可采用栅格数据的组合优化策略进行模型的构建,具体形式为:

$$\begin{cases} C(\text{PL}_i) = 0 \\ \min L = \text{argmin}(\text{PL}_i) \end{cases} \quad (9)$$

其中,参数项 $C(\text{PL}_i)$ 是机器人运行过程模型的约束模型,其主要是避免路径中的障碍物与机器人出现碰撞事故;参数项 $\min L$ 是 PL_i 选取的路径最小值。参数项 $C(\text{PL}_i)$ 的计算形式为:

$$C(\text{PL}_i) = \begin{cases} 1, \exists i, 1 \leq i \leq k, P_i \in O_{\text{obs}} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

基于以上模型定义,可将机器人运行过程模型的路径规划建模为约束优化问题,其优化目标是获得一条最短的不存在障碍物的线路,保证机器人可顺畅地最快速运行到目标终点。

2 智能水滴算法改进

2.1 IWD 算法

IWD 算法运行中主要涉及两个参数:水滴泥土参数 $\text{soil}(\text{IWD})$ 以及水滴运行速度 $\text{velocity}(\text{IWD})$ 。在水滴算法进化过程中这两个参数是时变

的^[13-14],在水滴由位置 i 到位置 j 的流动过程中,水滴运行的速度变化量是 $\Delta\text{velocity}(\text{IWD})$,该参数值与运行河道路径上的泥土参数量 $\text{soil}(i, j)$ 具有典型的反比函数关系:

$$\Delta\text{velocity}(\text{IWD}) = \frac{a_v}{b_v + c_v (\text{soil}(i, j))^2} \quad (11)$$

其中,参数项 a_v 、 b_v 和 c_v 是算法参数的预设定制。算法进化过程中参数 $\text{soil}(\text{IWD})$ 和 $\text{velocity}(\text{IWD})$ 的变化具有一致性,可表示为:

$$\Delta\text{soil}(\text{IWD}) = \Delta\text{soil}(i, j) \quad (12)$$

同时, $\text{soil}(\text{IWD})$ 和 $\text{velocity}(\text{IWD})$ 之间具有耦合关系, $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值会对 $\text{velocity}(\text{IWD})$ 取值产生一定影响,这种影响具有非线性特性,可表示为:

$$\Delta\text{soil}(\text{IWD}) = \frac{a_s}{b_s + c_s (\text{time}(i, j))^2} \quad (13)$$

其中,参数项 a_v 、 b_v 和 c_v 是算法参数的预设定制,另一参数 $\text{time}(i, j)$ 物理学计算模型为:

$$\text{time}(i, j) \propto \frac{d(i, j)}{\text{velocity}(\text{IWD})} \quad (14)$$

具体到 IWD 算法中,可利用算法参数进行如下定义:

$$\text{time}(i, j) = \frac{\text{HUD}(i, j)}{\text{velocity}(\text{IWD})} \quad (15)$$

其中,参数 $\text{HUD}(i, j)$ 是 IWD 算法中定义的启发函数,该函数为反向函数。

则 $\text{soil}(\text{IWD})$ 参数量的剩余量是:

$$\text{soil}(i, j) = \rho_0 \times \text{soil}(i, j) - \rho_n \times \Delta\text{soil}(i, j) \quad (16)$$

其中,参数 ρ_0 和 ρ_n 是 IWD 算法中定义的权重值,并且满足:

$$\rho_0 + \rho_n = 1 \quad (17)$$

水滴内 $\text{soil}(\text{IWD})$ 更新计算如下:

$$\text{soil}(\text{IWD}) = \text{soil}(\text{IWD}) + \Delta\text{soil}(i, j) \quad (18)$$

河道路径中 $\text{soil}(\text{IWD})$ 的取值越大,水滴的运行速度越慢,其对于水滴的运行起到阻碍作用,因此水滴会根据河道中 $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值大小进行路径的自适应选取,具体到 IWD 算法中则采用概率 $p(i, j)$ 对其进行表示,形式为:

$$\begin{cases} p(i, j) = \frac{f(\text{soil}(i, j))}{\sum_k f(\text{soil}(i, j))} \\ f(\text{soil}(i, j)) = \frac{1}{\varepsilon + g(\text{soil}(i, j))} \end{cases} \quad (19)$$

其中,参数 ε 是恒定正值;参数 g 可确保 $\text{soil}(\text{IWD})$ 参数转换是正值:

$$g(\text{soil}(i, j)) = \begin{cases} \text{soil}(i, j), & \text{if } \min(\text{soil}(i, j)) > 0 \\ \text{soil}(i, j) - \min(\text{soil}(i, j)), & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

其中,参数项 $\min(\text{soil}(i,j))$ 为 IWD 算法运行过程中河道环境最小泥土量 $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值。

2.2 邻域扰动 IWD 算法

在以上定义的 IWD 算法中,仅对水滴途径的河道 $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值进行更新,并未对整体的流经河道 $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值变化情况进行考虑。为了增加水滴成功运行的几率,提高水滴到达目标的成功率,具体见图 3。

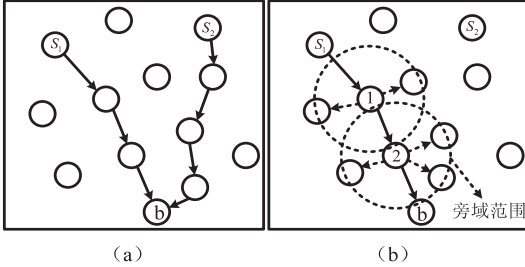


图 3 邻域扰动过程

图 3(a)和图 3(b)分别是文中选取的 IWD 算法以及设计的基于邻域扰动的改进算法示意。根据图 3(b)可知,IWD 算法中,水滴由位置 S_1 移向 S_2 过程中,会不断地对节点当前位置上的邻域位置进行广播探测,并根据河道中的 $\text{soil}(\text{IWD})$ 取值进行实时调整,可实现算法优化过程的性能改进。例如,机器人从位置 S_1 移向 S_2 过程中,需要选取一跳最佳的运行轨迹,其途径目的地 b ,在这个过程中,机器人会实时广播 $\text{soil}(\text{IWD})$ 信息数据包,对节点 j 邻域区间内的 $\text{soil}(\text{IWD})$ 数值进行实时更新,从而实现对 IWD 算法的实时更新。

$\text{soil}(\text{IWD})$ 数值更新可采用式 6 进行,对于水滴个体 j 邻域区间内的位置 k ,若其与目标位置 b 的间距比其与目标位置 j 的间距小,则 $\text{edge}(k,j)$ 的泥土信息数据不发生更新操作,否则位置 k 上将生成新的进化个体 IWD' 。该个体的 $\text{soil}(\text{IWD})$ 初始值设定成 0,速度参数 $\text{velocity}(\text{IWD}')$ 的初始值设定成 InitVel ,其更新模型为:

$$\text{velocity}(\text{IWD}') = \text{InitVel} + \frac{a_v}{b_v + c_v (\text{soil}(i,j))^2} \quad (21)$$

由此可得 $\text{edge}(k,j)$ 中 $\text{soil}(\text{IWD})$ 参数变化量计算如下:

$$\Delta\text{soil}(k,j) = \frac{a_s}{b_s + c_s (\text{HUD}(k,j)/\text{velocity}(\text{IWD}'))^2} \quad (22)$$

进而可得 $\text{edge}(k,j)$ 中的 $\text{soil}(\text{IWD})$ 参数更新如下:

$$\text{soil}(k,j) = (1 - \rho_n) \text{soil}(k,j) - \rho_n(1 + hd_k - hd_j) \Delta\text{soil}(k,j) \quad (23)$$

2.3 算法描述

在机器人路径规划中,机器人运行过程中的路径编码是实现优化过程的前提,水滴个体可模拟机器人的实时运行个体,机器人从初始位置出发,此时将机器人的路径集更新为空集。水滴个体可对机器人运行过程进行模拟,选取下一个最佳的路径途径位置^[15]。基于以上过程,可设计邻域扰动 IWD 算法,伪代码如下:

```

初始化:  $a_v, b_v, c_v, a_s, b_s, c_s, \rho_n, d, \text{ini\_soil}(i,j), \text{ini\_vel}_{\text{IWD}}$ ;
while 算法未终止 do
for  $\forall$  IWD do
设定候选表是  $\emptyset$ ;
while 路径未构建 do
IWD: = empty vehicle;
current node  $i$ : = depot;
while 限制条件不满足 do
计算路径概率  $\text{Pro}_{i,j}^{\text{IWD}}$ ;
决策路径位置  $(j)$ ;
更新  $\text{velocity}_{\text{IWD}}'; \Delta\text{soil}_{i,j}; \text{soil}'_{i,j}; \text{soil}'_{\text{IWD}}$ ;
current node  $i$ : = next node  $j$ ;
更新机器人路径数据;
endwhile
endwhile
评价路径选取效果;
endfor
更新最佳路径  $\text{TS}_e$ ;
更新全局最佳路径  $\text{GBS}$ ;
for 水滴精英个体 do
邻域更新;
endfor
endwhile
return 最佳路径方案。

```

3 实验分析

硬件配置:CPU i5-3500k,内存 16 G ddr3 2400k。软件平台:数值模拟软件 matlab2012a。利用计算机模拟标准测试方式实现对所提邻域扰动智能水滴算法的性能验证。

3.1 标准测试

首先选取标准测试函数对邻域扰动智能水滴算法的优化性能进行研究,选取的测试对象形式如下:

算例 1:

$$f_2 = \frac{1}{4\,000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \frac{x_i}{\sqrt{i}} + 1$$

算例 2:

$$f_3 = \sum_{i=1}^n (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2)$$

为更加清晰地对算法性能进行验证,选取原始的 IWD 算法、文中算法以及差分进化算法进行实验分

析。实验对比结果见图 4。

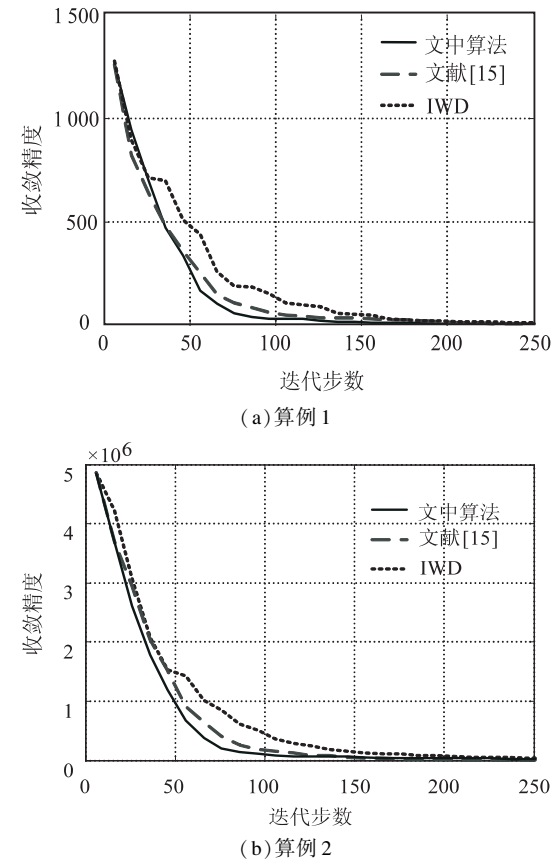


图 4 收敛对比

图 4 分别展示了原始 IWD 算法、文中算法以及差分进化算法在选取的算例 1 和算例 2 上的实验对比结果。根据实验结果可知,虽然在算法前期集中算法的收敛过程相差不明显,但是在中后期文中算法的收敛速度和收敛精度要显著优于选取的对比算法,体现了文中算法较好的收敛性能和精度指标,以及改进有效性。

3.2 路径规划实验

机器人路径规划过程中,设定栅格地图路径模型的分辨率指标是 1,水滴种群规模是 40, $\alpha = 2, \beta = 15$, 引力增益指标 $p = 100$,障碍物指标设定为 $\rho_0 = 2, \mu = 2, \varepsilon = 2$,实验区域设定为 30×30 栅格地图模型,对比算法选取原始智能水滴算法和文中改进的智能水滴算法。针对不同的栅格地图模型,设置智能水滴算法的迭代上限是 50,则设定的实验对象的路径优化结果见图 5。

在对比实验中,虽然两种测试算法均获得了优化结果,但是文中算法相对于原始智能水滴算法具有更快的收敛速度,其速度提升幅度达到 1 倍以上,并且在收敛精度上,文中算法可获得比原始智能水滴算法更短的机器人路径规划结果。根据以上实验结果可知,文中算法的收敛速度和机器人路径的优化结果均得到了全面提升。

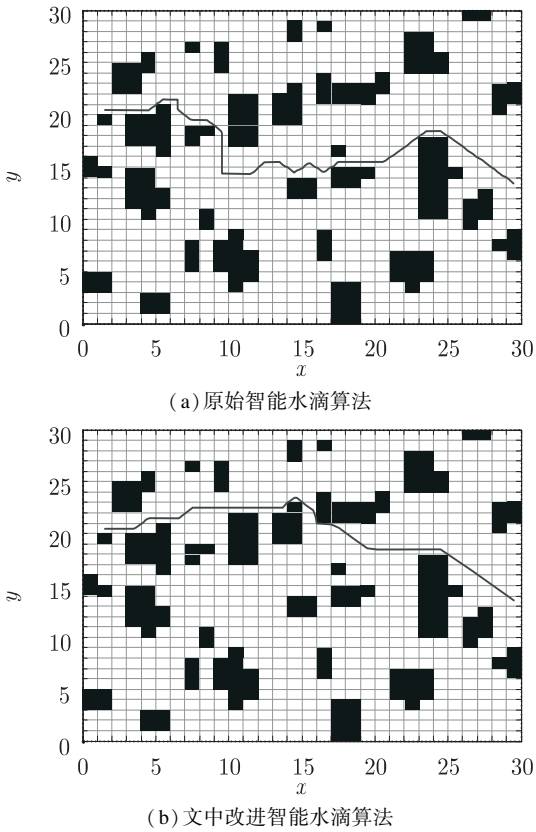


图 5 机器人路径规划结果

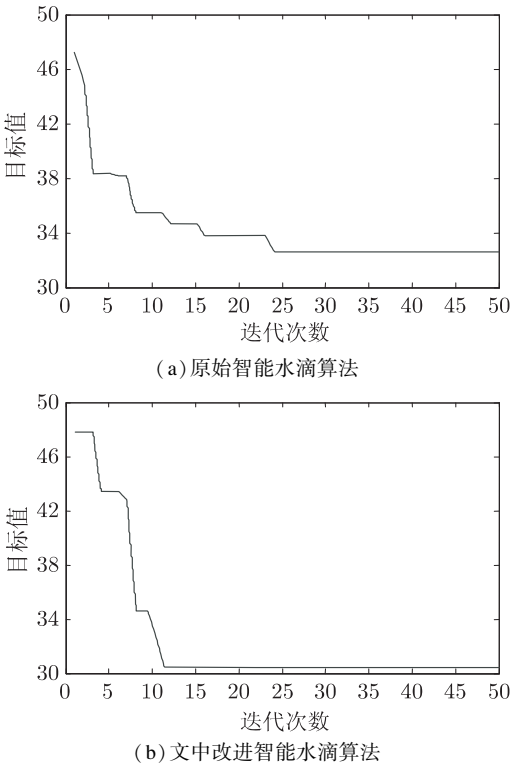


图 6 算法收敛实验曲线

4 结束语

文中提出一种基于改进智能水滴算法的移动机器人路径规划算法,主要贡献如下:(1)针对移动机器人路径规划问题,利用栅格模型对其进行模型构建,将其

简化为优化问题;(2)引入智能水滴算法,并采用邻域扰动过程对算法性能进行改进;(3)利用 Matlab 软件建立了移动机器人路径规划问题仿真平台,具有研究拓展性。下一步主要是对算法的计算时效性进行改进,主要从两个方面,即设计并行化的路径优化算法以及对算法本身进行改进,从而提高算法的收敛速度。

参考文献:

- [1] SASIKUMAR R, LENIN K. Assessing the influence of hand-arm posture on mechanical responses of the human hand during drilling operation[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(1-4): 375-384.
- [2] HE Zhaolan, PAN Bo, LIU Zongze, et al. The mechanical arm control based on harmony search genetic algorithm[J]. *Cluster Computing*, 2017, 20(4): 3251-3261.
- [3] RAGAB K A, BOUAICHA A, BOUAZARA M. Optimization of casting design parameters on fabrication of reliable semi-solid aluminum suspension control arm[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(9): 4450-4461.
- [4] 李建昌, 宫兴, 简晓慧, 等. 基于 AT89C52 单片机的消防救援机器人[J]. *消防科学与技术*, 2011, 30(12): 1163-1166.
- [5] BAGLIONI S, CIANETTI F, BRACCESI C, et al. Multibody modelling of N DOF robot arm assigned to milling manufacturing. Dynamic analysis and position errors evaluation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(1): 405-420.
- [6] SAYAPIN S N. Principles of the design of an adaptive mobile spatial rehabilitation manipulator robot based on an Octahedral Dodecapod [J]. *Biomedical Engineering*, 2017, 51(4): 296-299.
- [7] HAN Manfen, SONG Yuntao, CHENG Yong, et al. Erratum to: conceptual design and analysis of water hydraulic manipulator for CFETR blanket maintenance[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(3): 551.
- [8] HAN Manfen, SONG Yuntao, ZHAO Wenlong, et al. Erratum to: simulation and optimization of synchronization control system for CFETR water hydraulic manipulator based on AMESim[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(3): 571.
- [9] HE Bin, HAN Lizhi, WANG Yangang, et al. Kinematics analysis and numerical simulation of a manipulator based on virtual prototyping [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(5): 943-963.
- [10] LI Meng, GUO Weizhong. The design of a new remote manipulator for space operation using a 4-cable-driven thrusters-embedded configuration [J]. *Intelligent Service Robotics*, 2016, 9(3): 277-287.
- [11] ZHOU Fan, DONG Bo, LI Yuanchun. Torque sensorless force/position decentralized control for constrained reconfigurable manipulator with harmonic drive transmission[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, 15(5): 2364-2375.
- [12] SREEKUMAR M. A robot manipulator with adaptive fuzzy controller in obstacle avoidance[J]. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2016, 97(3): 469-478.
- [13] SAINI S S, SARKAR U, TUMAPALA T S, et al. A user friendly method for image based acquisition of constraint information during constrained motion of Servo manipulator in hot-cells[J]. *CSI Transactions on ICT*, 2016, 4(1): 17-21.
- [14] ALESHIN A K, GLAZUNOV V A, SHAI O, et al. Infinitesimal displacement analysis of a parallel manipulator with circular guide via the differentiation of constraint equations[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, 45(5): 398-402.
- [15] SATO O, SATO A, TAKAHASHI N, et al. Analysis of the two-link manipulator in consideration of the horizontal motion about object[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2016, 21(1): 43-48.
- [16] (上接第 48 页)
- [17] technology, 2013, 12(2): 115-119.
- [18] WANG W, JING T T, BUTCHER B. FPGA based on integration of memristors and CMOS devices[C]//*Proceedings of 2010 IEEE international symposium on circuits and systems*. Paris: IEEE, 2010: 1963-1966.
- [19] ROSE G S, MANEM H. A hybrid CMOS-nano FPGA based on majority logic: from devices to architecture[C]//*CMOS processors memories*. Berlin: Springer - Verlag, 2010: 139-161.
- [20] SHIN K, KIM S, KANG S. Reconfigurable stateful NOR gate for large-scale logic-array integrations[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2011, 58(7): 442-446.
- [21] GAO L, ALIBART F, STRUKOV D. Programmable CMOS/memristor threshold logic [J]. *IEEE Transactions on Nano-*
- [22] ZHU X, YANG X, WU C, et al. Performing stateful logic on memristor memory [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2013, 60(10): 682-686.
- [23] YAKOPCIC C, TAHA T M, SUBRAMANYAM G, et al. A memristor device model[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(10): 1436-1438.
- [24] KVATINSKY S, FRIEDMAN G, KOLODNY A, et al. TEAM: threshold adaptive memristor model[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(1): 211-221.
- [25] BIOLEK D, VENTRA M D, PERSHIN Y V. Reliable SPICE simulations of memristors, memcapacitors and meminductors [J]. *Radioengineering*, 2013, 22(4): 945-968.