

基于改进蚁群算法与Morphin算法的机器人路径规划方法

万晓凤, 胡伟, 郑博嘉, 方武义

南昌大学电气与自动化工程系, 南昌 330031

摘要 针对动态复杂环境下的机器人路径规划问题, 建立栅格地图模型, 研究一种改进蚁群算法与Morphin算法相结合的动态路径规划方法。改进蚁群算法引入拐点参数评价路径优劣, 并对路径进行拐角处理以及变更拐角处信息素更新机制, 使规划的全局路径更加平滑; Morphin算法则在机器人行走时, 根据全局路径的局部环境实时规划局部路径, 使机器人有效地躲避障碍物。仿真试验结果表明, 该方法结合全局规划与局部规划的特点, 能够使机器人沿着一条短而平滑的最优路径快速、安全地到达目标点。

关键词 动态路径规划; 改进蚁群算法; Morphin算法; 拐角处理

中图分类号 TP18; TP24

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.03.014

Robot path planning method based on improved ant colony algorithm and Morphin algorithm

WAN Xiaofeng, HU Wei, ZHENG Bojia, FANG Wuyi

Electrical and Automation Engineering Department, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Abstract A hybrid planning method combining an improved ant colony algorithm with Morphin algorithm is proposed for dynamic path planning for robot in complicated environment. Grid method is adopted to establish the model. The robot uses the improved ant colony algorithm for global path planning first, then uses Morphin algorithm for partial obstacle avoidance when it is marching on. The improved ant colony algorithm introduces an inflection point parameter to evaluate the path, so that the corner of the path is disposed and the updating mechanism of corner pheromone is changed. The Morphin algorithm is disposed with adjacent grid to meet the grid environments. This method combines the characteristics of global planning with local planning, which can not only realize real-time path planning according to the environment, but also guide the robot to the target with the global optimal path. Simulation results indicate that this method can make the robot avoid obstacles along a short and smooth path to quickly reach the target point.

Keywords dynamic path planning; improved ant colony algorithm; Morphin algorithm; corner disposed

路径规划技术是机器人研究领域的一个重要环节, 路径规划是指在有障碍物的环境中依据某些优化准则(如路径最短, 时间最少, 最安全等), 寻找一条从起始点到目标点之间安全无碰撞的最优或次优路径^[1]。路径规划又分为环境完全已知的全局路径规划和完全未知或部分未知的局部路径规划^[2]。目前国内外针对路径规划问题提出了很

多算法, 主要有可视图法、拓扑法、人工势场法等。随着智能算法的发展, 模糊逻辑算法、神经网络算法、遗传算法、蚁群算法及微粒群算法等也被广泛应用于机器人路径规划当中^[3]。这些算法各有优缺点, 例如人工势场法简单且容易实现, 但容易陷入局部极小值; 遗传算法具有很好的全局求解能力, 但运算效率不高。为此, 本文研究一种改

收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2014-12-26

基金项目: 江西省科技支撑项目(20133BBE50029); 江西省科技厅工业支撑计划项目(20132BBE50049)

作者简介: 万晓凤, 教授, 研究方向为计算机控制与嵌入式智能仪表, 电子邮箱: xfwan_jx@163.com

引用格式: 万晓凤, 胡伟, 郑博嘉, 等. 基于改进蚁群算法与Morphin算法的机器人路径规划方法[J]. 科技导报, 2015, 33(3): 84-89.

进蚁群算法与Morphin算法相结合的机器人动态路径规划方法。

1 栅格地图模型

在一个二维的机器人工作环境中,存在着有限个不同大小的已知静态障碍物、未知静态障碍物以及动态障碍物。采用栅格法对机器人工作环境进行建模,栅格地图模型如图1所示,模型的栅格规模为 20×20 ,其中白色栅格为自由栅格,黑色栅格为障碍栅格,为保障机器人安全,在描述障碍时把障碍物外扩1个机器人的最大直径,障碍不满1个栅格则填充满此栅格^[2,4]。自由栅格为机器人可行节点,当机器人前往下一节点需要经过障碍栅格边界点时则下一节点不可行。

从左至右、从上至下对模型中的栅格进行编码。坐标以左下方为原点,从左至右为 x 轴正方向,从下至上为 y 轴的正方向,每个栅格长度记为单位长度。设栅格序号为 c ,每行每列的栅格数为 n ,则栅格序号 c 与坐标有唯一的映射关系,其表达式为

$$\begin{cases} x = \text{mod}(c, n) - 0.5 \\ y = n - 0.5 - \text{int}\left(\frac{c}{n}\right) \end{cases} \quad (x = -0.5, x = n - 19.5) \quad (1)$$

式中,mod为取余函数,int为取整数函数。

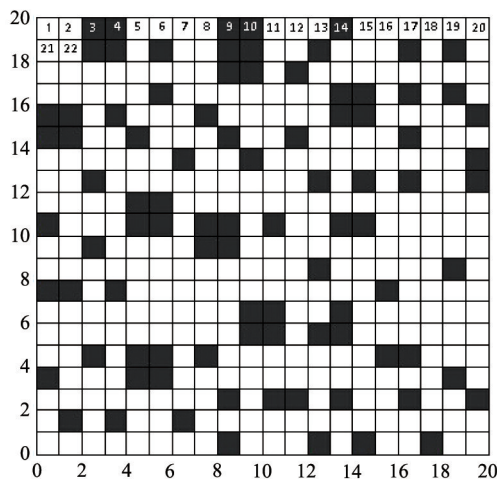


图1 栅格地图模型

Fig. 1 Grid map model

2 蚁群算法改进与全局规划

蚁群算法来源于自然界蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。最早作为一种解决组合优化问题的元启发式算法被Dorigo提出,并成功地应用于旅行商问题^[5],之后被广泛地应用于各种优化问题。它采用分布式并行计算机制,有易与其他方法结合、鲁棒性较强等优点^[6]。蚂蚁寻找食物的过程与机器人路径规划问题有着许多相似之处,因此成为机器人路径规划领域研究的热点。

为模拟自然界蚂蚁的行为,假设地图中出发点为蚁穴,目标点为食物源。整个路径规划过程可以看成是蚁群在地图中寻找食物的过程,因为蚂蚁可以在其行走过的路径上释放一种信息素,而在一定时间内,其他蚂蚁可以感知到这种信息素的存在,并倾向于朝着此种物质浓度高的方向行走,蚂蚁通过此种正反馈作用,表现出路径最短,聚集的蚂蚁更多,并逐渐引导后续蚂蚁选择此路径。蚂蚁间就是通过这样相互沟通、协调,最终避开障碍物找到一条最优或次优路径。

2.1 蚁群算法描述

假设蚂蚁数量为 M ,地图栅格规模为 $n \times n$,蚂蚁波数为 K ,蚁群算法如下。

1) 概率选择。蚂蚁通过轮盘赌方法选择将要前进的节点,其概率表达式为

$$P^m(i, j) = \begin{cases} \frac{\tau(i, j)^\alpha \cdot \eta(i, j)^\beta}{\sum_{j \in J_i} \tau(i, j)^\alpha \cdot \eta(i, j)^\beta} & (j \in J_i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P^m(i, j)$ 为第 m 只蚂蚁从节点 i 到节点 j 的概率; $\tau(i, j)$ 为节点 i 至节点 j 边上的信息素,各边的初始值为同一常数 C ; J_i 为节点 i 四周8个节点中除障碍节点及禁忌节点的集合(机器人只能向四周8个节点前进),禁忌节点表 TABU_m 存入蚂蚁已行节点; $\eta(i, j)$ 为 i, j 两节点间的期望值,与两节点间距离成反比; α, β 分别为信息素和期望值的启发因子^[7]。

2) 信息素更新。每次所有蚂蚁寻迹完成后要对信息素进行全局更新,过去的信息素逐渐消逝,并加入新的信息素。更新规则表达式为

$$\tau_{k+1}(i, j) = (1 - \rho)\tau_k(i, j) + \Delta\tau(i, j) \quad (3)$$

$$\Delta\tau(i, j) = \sum_{m \in M_{ij}} \Delta\tau^m(i, j) \quad (4)$$

$$\Delta\tau^m(i, j) = Q/L_m \quad (5)$$

式中, ρ 为挥发系数,一般取0~1之间的常数; $\tau_k(i, j)$ 为 k 时刻节点 i, j 间的信息素; $\tau_{k+1}(i, j)$ 为 $k+1$ 时刻节点 i, j 间的信息素; $\Delta\tau(i, j)$ 为本次循环节点 i, j 间的信息素增量,由式(4)决定; M_{ij} 为经过路线 ij 的蚂蚁集合; $\Delta\tau^m(i, j)$ 为第 m 只蚂蚁留在节点 i, j 间的信息素增量,由式(5)决定; L_m 为第 m 只蚂蚁所寻路径的长度; Q 为一适当正常数。

3) 迭代循环。每轮信息素更新完成后所有蚂蚁再次从起始点重新寻迹,经 K 次迭代后,得出最短路径。

2.2 蚁群算法改进及全局路径规划

2.2.1 蚁群算法改进策略

针对基本蚁群算法搜索时间过长、易陷入局部最优等缺点,以及应用于机器人路径规划问题的特殊性^[8,9],需要对其加以改进,主要是改进概率公式期望值、路径评价标准、拐角处理和信息素更新机制。

1) 概率公式期望值。由于基本蚁群算法期望值采用的是当前节点到下一节点的距离反比函数,而这种情况下 $\eta(i, j)$ 只有2个值,不利于选择下一个更优节点。而采用节点 j 到目

标节点的距离来设定期望值,所有下一个可行节点的期望值都是不同的,其中距离目标点最近的节点的期望值最大,因此可使蚂蚁更加倾向于选择离目标节点更近的节点,所寻路径长度更优。改进期望值后概率公式为

$$P^m(i,j) = \begin{cases} \frac{\tau(i,j)^\alpha \cdot \eta(j,E)^\beta}{\sum_{j \in J_i} \tau(i,j)^\alpha \cdot \eta(j,E)^\beta} & (j \in J_i) \\ 0 & (\text{o th erwise}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\eta(j,E)$ 为节点 j 到目标节点的期望值,其值为 E_p/L_{jE} , L_{jE} 为 j 点到目标点的距离, E_p 为一适当正常数。

2) 路径评价标准。机器人在行走的过程中,为节省机器人到达目标点的时间,需要考虑的不只是路径的长度,同时也需要考虑路径的平滑度,使机器人尽量少转弯,因此加入拐点参数作为路径评价之一。由式(5)可知,基本蚁群算法中,第 m 只蚂蚁经过 ij 段需增加的信息素为第 m 只蚂蚁所寻路径长度的反比函数,路径越长,增量越少。加入路径拐点参数按比例与路径长度相加,则可利用这两个参数评价路径的优劣,由此决定需增加的信息素,使所寻路径的长度与平滑度综合最优。在栅格法模型中,机器人所寻路径只有3种角,分别为锐角、直角、钝角,设其值分别为3、2、1,把所有角度值相加即可得拐点参数值。改进的信息增量表达式为

$$\Delta\tau^m(i,j) = Q/(L_m + \lambda G_m) \quad (7)$$

式中, G_m 为第 m 只蚂蚁所寻路径的拐点参数; λ 为加权系数。

3) 拐角处理。在栅格法模型中,所求路径经常会出现一些不必要的拐角(锐角、直角),可对其进行适当处理。拐角处理方法如图2所示,若 $|c_{i+2} - c_i| = N$ 或 1 ,则路径中存在锐角,可将节点 c_{i+1} 删除,形成新路径如图2(a)中的红色虚线;若 $|c_{i+2} - c_i| = N+1$ 或 $N-1$,且 c_i 到 c_{i+2} 可行,则路径中存在可处理的直角,将节点 c_{i+1} 删除,形成新路径如图2(b)中的红色虚线;同理,用 c_i 至 c_{i+2} 的中点代替节点 c_{i+1} ,形成新路径如图2(c)中的红色虚线。对每次迭代最优路径进行拐角处理若干次,直至没有需要处理的拐角,即可得到新的迭代最优路径。

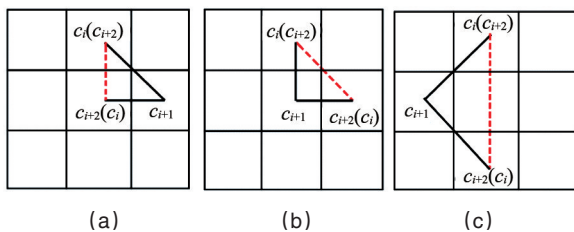


图2 拐角处理示意

Fig. 2 Diagrams of corner disposed

4) 信息素更新机制。在基本蚁群算法中,各边信息素采用式(3)进行更新,增量由蚂蚁所寻路径长度决定。为增加最优蚂蚁所寻路径对后续蚂蚁的引导,若每次迭代后经拐角处理的最优路径优于全局最优路径,则对其给予一定的信息素奖励,用 τ_r 表示。拐角处理可以很好地改善每次迭代最优

路径,而图3中的拐角虽然不能对其进行拐角处理,但也可通过调整信息素减小其形成的概率。为避免后续蚂蚁重复走一些不必要的拐角,对拐角处理前形成拐角的边(如图2及图3中的 $c_{i+1}c_{i+2}$ 边)给予一定的信息素削弱,并对拐角处理时新添加的边(如图2中的虚线边)给予一定的信息素增强,其大小用 τ_c 表示。 τ_r, τ_c 的表达式为

$$\tau_r(i,j) = \begin{cases} \gamma Q/L_b & (ij \in B) \\ 0 & (\text{o th erwise}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau_c(i,j) = \begin{cases} \pm\tau^* & (ij \in D) \\ 0 & (\text{o th erwise}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, L_b 为目前找到的全局最优解评价; γ 为权值; τ^* 为一适当正值; B 为组成目前最优解路径的边集合; D 为需额外更新信息素的边集合。

修改后的信息素更新表达式为

$$\tau_{k+1}(i,j) = (1 - \rho)\tau_k(i,j) + \Delta\tau(i,j) + \tau_r(i,j) + \tau_c(i,j) \quad (10)$$

并引入最大最小蚂蚁系统(MMAS)中限定信息素阈值^[10,11],即

$$\tau_{k+1}(i,j) = \begin{cases} \tau_{\min} & (\tau_{k+1}(i,j) < \tau_{\min}) \\ \tau_{\max} & (\tau_{k+1}(i,j) > \tau_{\max}) \end{cases} \quad (11)$$

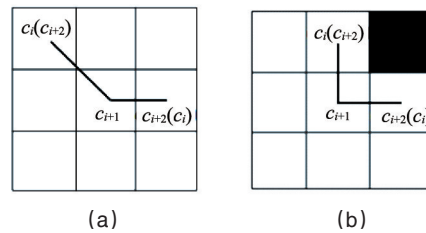


图3 形成拐角的路径

Fig. 3 Path forming the corner

抑制算法过早停滞。

2.2.2 全局路径规划流程

改进的蚁群算法用于全局路径规划的流程如下:

- 1) 构建环境模型,初始化各参数,设置最大迭代次数 K , 令 $k=1, m=1, \tau = \tau_{\max}$ 。
- 2) 把蚂蚁 $m(m=1,2,\dots,M)$ 放在初始位置,并把初始点加入禁忌表 $TABU_m$ 。
- 3) 根据式(6),使当前蚂蚁 m 转移至下一节点,并修改禁忌表,如此循环,直到蚂蚁到达目标节点。若中途蚂蚁落入U型陷阱,无下一节点可走,则判断此蚂蚁死亡。
- 4) 存储当前蚂蚁 m 的所寻路径及路径长度,删除死亡蚂蚁,默认其路径长度为无穷大。令 $m=m+1$,若 $m < M$,则返回第2步。
- 5) 选取最优路径进行拐角处理,并记录额外信息素量 τ_r, τ_c 。
- 6) 按式(8)、式(9)、式(10)及式(11)进行信息素更新。令迭代次数 $k=k+1$,若 $k < K$,则 $m=1$,返回第2步。

7) 算法结束,输出最优路径。

3 Morphin 算法与局部规划

3.1 Morphin 算法描述

Morphin 算法是 CMU 根据 Ranger 算法提出的基于地面分析的局部路径规划算法^[12],也是一种基于栅格的局部地形可行性分析的局部避障算法。其实质是根据机器人自身传感器检测到的实时环境信息,统计前方数条备选弧线路径的通行信息,可通行性根据机器人当前的状态,包括滚动、俯仰、偏角以及前方路径的适宜度、确定度,选出一条最适宜通行的路径,其中确定度与前方路径长度有关,适宜度与机器人状态及前方路径崎岖度有关。该算法计算量少、效率高,不仅能较好地处理环境建模的不确定性,而且能与全局规划算法较好地结合,共同决策机器人巡视探测器的底层运动行为。Morphin 算法备选弧线路径如图 4 中所示,其中矩形代表

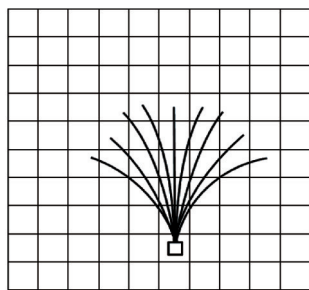


图 4 Morphin 备选弧线路径

Fig. 4 Alternative arc of Morphin

机器人。

设机器人工作空间为二维栅格环境,为更好地对弧线进行评价,将弧线映射到最靠近弧的几个栅格点,栅格的可行性不涉及坡度及粗糙度,采用的评价函数为

$$f = \begin{cases} \infty & (\text{Arc} \supset \text{Ob}) \\ \alpha_1 L + \alpha_2 G + \alpha_3 \Delta l + \alpha_4 R_i & (\text{o t h e r w i s e}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, L 、 G 分别为每条弧线路径的长度及拐点参数; Δl 是弧线的每个栅格点到子目标点的距离平均值; R_i 为每条弧线与全局规划路径的反交点数,即交点越多, R_i 越小,反之越大; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为各参数权值。当弧线(Arc)包含障碍物(Ob)时 f 为无穷大, f 最小的弧线即为局部环境最优路径,所得到的路径具有长度、平滑度综合较优且趋近于全局路径的优点。

3.2 局部避障规划

Morphin 算法是根据机器人传感器检测的实时局部环境进行局部规划。在动态不确定环境中,当机器人沿着已规划好的全局路径行走时,很有可能会遭遇一些未知的静态或动态障碍物的阻挡。因此,借鉴滚动优化原理,采取时间滚动窗口概念,使机器人每隔一定时间通过对周围环境的探测更新工作地图,并根据不同滚动窗口环境的变化预测动态障碍物的运动轨迹与速度^[13],当机器人探测到有障碍物将会与自身相撞时,则调用 Morphin 算法进行局部避障。

假设机器人的可视范围为正前方以 8 个栅格为半径的半圆。当前方路径有静态障碍物时,机器人以距离静态障碍物 3 个栅格的节点为起始点调用 Morphin 算法进行避障。如果前方存在动态障碍物,机器人对障碍物是否会与自身相撞进行预测。若预测不会与障碍物相撞,如图 5(a) 所示,机器人继续行走。若预测会在前方路径 A 点与障碍物相撞,如图 5(b) 所示,但短时间内障碍物将离开前方路径,则机器人暂停行走等待障碍物离开 A 点后继续前行。若预测会在前方路径不可避免地与障碍物相撞,如图 5(c) 所示,则立即调用

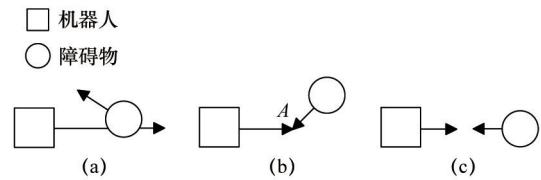


图 5 机器人与动态障碍物相遇

Fig. 5 Robot meeting with dynamic obstacles

Morphin 算法进行避障。

为适应栅格环境以及简化算法计算量,画 5 条弧线,中间直线始终指向机器人子目标点,两边分别以一定半径画 2 条弧线,弧线映射到邻近的栅格节点。子目标点选在前方一定距离的全局路径上。当所选最优路径走回到已规划的全局路径上时,结束 Morphin 算法规划。当备选的 5 条路径都不可行时,将所画弧线在原子目标方向逆时针旋转一定角度,若依然不可行则在原子目标方向顺时针旋转一定角度,若还是不可行则加大旋转角度,依此直至旋转角度达到 180°, Morphin 算法找不到可行路径,则终止局部规划,重新调用全

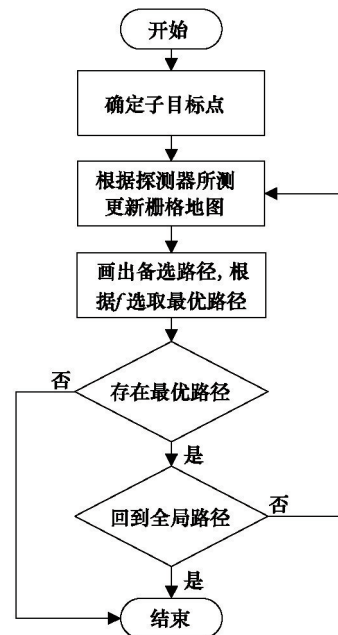


图 6 Morphin 算法流程

Fig. 6 Flow chart of Morphin algorithm

局规划算法。局部规划算法流程如图6所示。

4 仿真试验结果分析

采用全局规划与局部规划结合的方法进行路径规划,全局路径规划采用改进的蚁群算法,局部避障采用Morphin算法,整个算法流程如图7所示。首先改进蚁群算法规划出初始全局路径,然后机器人开始沿着全局路径行走,途中遭遇障碍物则调用Morphin局部算法,躲避障碍并行驶到前方的全局路径上,若局部算法无法找出可行路径,则调用全局算

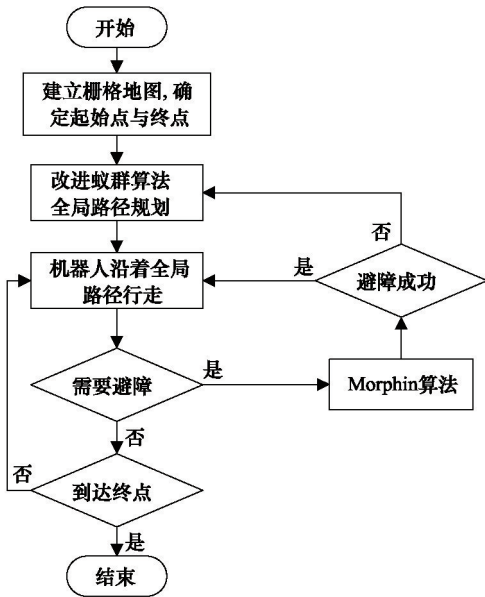


图7 混合算法流程

Fig. 7 Flow chart of hybrid algorithm

法重新规划路径。

为验证本文算法的有效性,用Matlab 2011b对算法进行仿真。计算机配置为CPU 2.13 GHz、内存1.00 GB,栅格地图模型为40×40,蚁群算法蚂蚁数目为80,最大迭代次数为80,经反复调试,算法主要参数如表1所示。全局路径规划结果如图8所示,其中综合评价 $\lambda=2$,即2倍的拐角参数与路径长度相加所得结果。图8中的虚线为MMAS算法结果,实线为改进蚁群算法(IACO)结果,可以看出,两种算法都能够克服

U型槽,并找到一条较短的路径,但MMAS算法所寻路径有较多的拐点,而改进蚁群算法所寻路径的拐点很少,大大提升

表1 算法主要参数

Table 1 Main parameters of the algorithm

参数	α	β	ρ	E_p	Q	γ	τ_{min}
数值	1.1	20	0.4	150	45	3	0.1
参数	τ_{max}	τ^*	α_1	α_2	α_3	α_4	
数值	40	8	1	1	1.3	0.6	

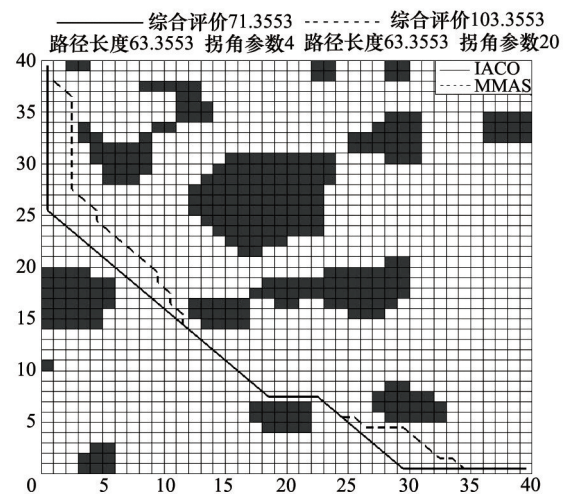


图8 改进蚁群算法全局规划

Fig. 8 Improved algorithm in global planning

了路径的平滑性,综合性能更优。

表2所示为改进蚁群算法与MMAS算法分别运行20次的结果统计比较。MMAS算法得到的最优路径长度与改进蚁群算法相同,从多次运行效果来看,其结果也相差不大,说明两种算法在路径长度寻优上的效果相当。但是,MMAS算法的路径拐点参数平均值在20以上,这将影响机器人的行走速度。而改进蚁群算法的路径拐点参数大大减小,路径平滑度优于MMAS算法,两者计算时间相差不大。因此,本文方法不但能够有效地抑制搜索陷入局部最优,还可搜寻到短而平

表2 全局路径规划结果比较

Table 2 Comparison of the improved algorithm with MMAS in global planning

算法	最优路径			平均路径			平均迭代次数	平均花费时间/s
	综合	长度	拐角	综合	长度	拐角		
改进蚁群算法	71.3553	63.3553	4	75.4725	63.4725	6	40.5	123.854
MMAS算法	103.3553	63.3553	20	110.1310	63.7310	23.2	44.3	135.475

滑的全局路径,使机器人免于不断转变方向,可以快速行走。

在有未知动态障碍物环境下,Morphin算法的避障仿真结果如图9所示。当机器人按照全局规划路径(图8)行走,将

要到达A点时,探测到将会与动态障碍物Od相撞于B点,机器人立即调用Morphin算法进行局部路径规划,图中粗线为生成的备选路径,红色虚线为选中的最优局部路径,可以看

出,机器人通过较优局部路径避开Od回到了全局规划路径上。Os1和Os2为栅格地图中的未知静态障碍物,机器人分别在C点和D点调用Morphin算法进行局部规划,机器人仍然可以找出较优局部路径避开Os1、Os2回到全局规划路径上,而一次调用Morphin算法平均花费时间为0.031 s,证明机器

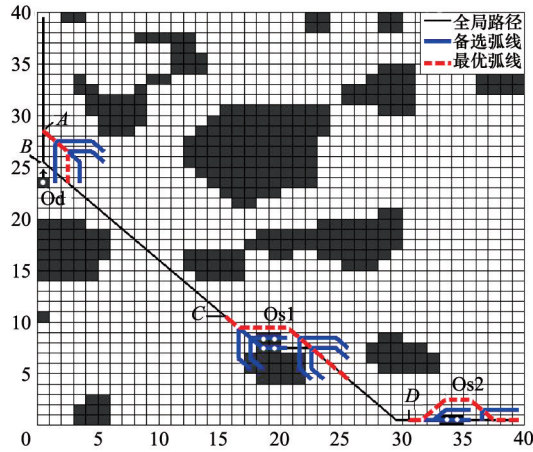


图9 局部避障算法仿真结果

Fig. 9 Simulation result of local obstacle avoidance algorithm

人可以快速反应完成局部规划。

5 结论

提出了一种基于改进蚁群算法与Morphin算法的动态复杂环境下机器人路径规划方法。该方法能够通过全局规划算法寻找最优路径指引机器人行走,又可根据局部环境实时规划局部路径,使机器人躲避障碍物继续沿着全局最优路径快速、安全到达目标点。

参考文献(References)

- [1] 姚俊武,张林仙.非结构环境下移动机器人路径规划[J].科技导报,2010,28(22):82-85.
Yao Junwu, Zhang Linxian. Path planning of mobile robot in unstructured environment[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(22): 82-85.
- [2] 朱磊,樊继壮,赵杰,等.基于栅格法的矿难搜索机器人全局路径规划与局部避障[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(11):3421-3428.
Zhu Lei, Fan Jizhuang, Zhao Jie, et al. Global path planning and local obstacle avoidance of searching robot in mine disasters based on grid method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(11): 3421-3428.
- [3] 李学洋,李悦,张亚伟.基于遗传变异蚁群算法的机器人路径规划的改进[J].电子设计工程,2012,20(15):38-40.
Li Xueyang, Li Yue, Zhang Yawei. Improved ant colony algorithm based on genetic variation apply in robots path planning[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(15): 38-40.
- [4] 罗荣贵,屠大维.栅格法视觉传感集成及机器人实时避障[J].计算机工程与应用,2011,47(24):233-235.

- Luo Ronggui, Tu Dawei. Vision sensors integration based grid-method for robot real-time obstacle detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(24): 233-235.
- [5] Dorigo M, Caro G D. Ant Colony Optimization: a new meta-heuristic [C]//Proceedings of 1999 Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 1999: 1470-1477.
- [6] 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].控制与决策,2004,19(12):1321-1326.
Duan Haibin, Wang Daobo, Zhu Jiaqiang, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application[J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1321-1326.
- [7] 蔡荣英,王李进,吴超,等.一种求解旅行商问题的迭代改进蚁群优化算法[J].山东大学学报:工学版,2012,42(1):6-11.
Cai Rongying, Wang Lijin, Wu Chao, et al. A kind of iterative improvement based ant colony optimization algorithm for the traveling salesman problem[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(1): 6-11.
- [8] Xiong W Q, Wei P. A kind of ant colony algorithm for function optimization[C]//Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. New York: IEEE, 2002: 552-555.
- [9] 周明秀,程科,汪正霞.动态路径规划中的改进蚁群算法[J].计算机科学,2013,40(1):314-316.
Zhou Mingxiu, Cheng Ke, Wang Zhengxia. Improved ant colony algorithm with planning of dynamic path[J]. Computer Science, 2013, 40(1): 314-316.
- [10] Stützle T, Hoos H. MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem[C]//Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 1997: 309-314.
- [11] 肖本贤,刘刚,余雷,等.基于MMAS的机器人路径规划[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(1):63-67.
Xiao Benxian, Liu Gang, Yu Lei, et al. Robot path planning based on the MAX-MIN ant system[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(1): 63-67.
- [12] Simmons R, Henriksen L, Chrisman L, et al. Obstacle avoidance and safeguarding for a lunar rover[C]//Proceedings of AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics. Madison, Wisconsin: AIAA, 1996.
- [13] 宋红生,王东署.基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J].机床与液压,2012,40(20):120-125.
Song Hongsheng, Wang Dongshu. Path planning for mobile robot based on modified ant colony optimization[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(20): 120-125.

(责任编辑 韩星明)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。