

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903010



# 邻近障碍物整体化的机器人路径规划

贾丙佳, 李平

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对采用传统的人工势场法进行路径规划时,在障碍物密集分布的区域容易使机器人陷入其中,导致停止不前或循环往复,出现局部极小值的问题,提出一种密集邻近障碍物整体化的机器人路径规划方法.首先,通过传感器检测障碍物的位置信息,根据相邻障碍物之间的距离划分密集分布的障碍物区域;然后,以该区域的中心为圆心,确定一个外接圆,对障碍物进行整体化处理;最后,用整体化障碍物替代原先的多个障碍物.在 MATLAB 软件平台上,对文中方法进行仿真.结果表明:与传统人工势场法相比,文中方法可以有效避开局部极小值,顺利完成路径规划任务;与增设引导点的方法相比,文中方法可有效减少机器人从起始位置到达目标位置的时间,提高路径规划的效率.

**关键词:** 自主移动机器人; 路径规划; 邻近障碍物整体化; 人工势场法; 局部极小值

**中图分类号:** TP 242.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0799-07

## Robot Path Planning With Integration of Neighbouring Obstacles

JIA Bingjia, LI Ping

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the robot is easily trapped in the area where obstacles are densely distributed in the traditional artificial potential field method for path planning, stopping or reciprocating, leading to local minimum, a robot path planning method of integrating densely adjacent obstacles is proposed. Firstly, the location of obstacles is detected by sensors. According to the distance between adjacent obstacles, the densely distributed obstacle areas are divided; then, taking the center of the area as the circle center, a circumscribed circle is determined, and the obstacles are treated as a whole; finally, the integral obstacles are used to replace the original obstacles. On the MATLAB software platform, the proposed method is simulated. The results show that compared with the traditional artificial potential field method, the proposed method can effectively avoid the local minimum and successfully complete the path planning task. Compared with the method of adding guidance points, the proposed method can effectively reduce the time from the initial position to the target and improve the efficiency of path planning.

**Keywords:** autonomous mobile robot; route plan; integration of neighbouring obstacles; artificial potential field method; local minimum point

超市导购机器人<sup>[1]</sup>、家庭服务机器人<sup>[2]</sup>等自主移动机器人能够按照某种性能指标从起始点出发,寻

**收稿日期:** 2019-03-05

**通信作者:** 李平(1981-),女,副教授,博士,主要从事非线性系统与智能控制、复杂控制系统的研究. E-mail: pingping\_1213@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61603144);福建省自然科学基金资助项目(2018J01095);福建省高校产学研合作科技重大项目(2013H6016);华侨大学中青年教师科技创新资助计划项目(ZQN-PY509)

找一条最优或次优的路径,从而到达目标位置<sup>[3-4]</sup>.因此,路径规划成为研究这类机器人的核心问题.目前,解决移动机器人路径规划的算法有人工势场法<sup>[5-7]</sup>、蚁群算法<sup>[8]</sup>、栅格法<sup>[9]</sup>、可视图法<sup>[10]</sup>、A\*算法<sup>[11]</sup>等.其中,人工势场法具有结构简单、计算量小及规划的路径较为平滑的特点,因此,被广泛应用于移动机器人的路径规划中.然而,对于传统人工势场法,当机器人被一系列障碍物包围时,在包围区域的某些位置目标点的引力与障碍物的斥力大小相等、方向相反,此时,机器人陷入局部极小值<sup>[12-13]</sup>而徘徊不前,导致路径规划失败.为了使机器人能够摆脱局部极小值陷阱,国内外研究者进行了广泛的研究.Fazli等<sup>[14]</sup>提出一种沿墙走跟踪算法,解决局部极小值陷阱问题;程拥强等<sup>[15]</sup>提出极限环法,使机器人以圆弧状轨迹绕过障碍物到达目标位置,解决目标点附近存在障碍物的问题.然而,在机器人进行路径规划的过程中,这两种算法存在计算量大、规划速度慢的问题.文献[16-18]通过增加中间目标点的方法,使机器人在陷入局部极小值时,所受合力不为零.宋建辉等<sup>[19]</sup>在极小值附近自主建立虚拟目标牵引点,并隔离原有目标点,使机器人走出局部极小值;王萌等<sup>[20]</sup>在机器人陷入局部极小值时,对机器人施额外控制力.这些方法在一定程度上解决了局部极小值的问题,但是对于障碍物密集分布的情况,机器人需要检测当前时刻和上一时刻的行走距离,以判断是否陷入局部极小值,若陷入后再增设引导点,引导机器人摆脱陷阱,这无疑增加了计算时间,降低了效率.因此,本文针对人工势场法存在的局部极小值问题,提出一种密集邻近障碍物整体化的机器人路径规划方法.

## 1 人工势场法及其存在的问题

人工势场法是由 Khatib 于 1986 年提出的一种虚拟力的方法.在机器人运动的环境中,目标位置是机器人最终要到达的位置,假设目标位置对机器人产生吸引力,且随着机器人的靠近,吸引力减小;而障碍物则阻碍机器人前进,假设对机器人产生排斥力,随着机器人的靠近,排斥力增加<sup>[21]</sup>.这两个力叠加产生的合力将驱使机器人绕开障碍物朝目标点移动.势场中机器人的受力分析,如图 1 所示.图 1 中: $\mathbf{F}_{\text{rep}}$ 为障碍物与机器人之间的排斥力; $\mathbf{F}_{\text{att}}$ 为目标点与机器人之间的吸引力; $\mathbf{F}$ 为机器人受到的合力,合力决定了机器人的最终运动方向.

为了简化移动机器人的路径规划分析,假设机器人为一个质点,其运动空间是二维空间;另外,假设障碍物的影响范围为 $\rho_0$ ,同样用质点表示其在二维空间中的位置.传统人工势场法定义的引力势场函数表示为

$$U_{\text{att}}(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \xi \rho_1^2.$$

(1)

由引力势场函数的负梯度,可得相应的吸引力 $\mathbf{F}_{\text{att}}$ ,即

$$\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{\text{att}}(\mathbf{p}) = -\xi \rho_1.$$

(2)

式(1),(2)中: $\xi$ 为大于零的引力场系数; $\rho_1$ 为机器人与目标点之间的欧氏距离, $\rho_1 = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{goal}}\|$ , $\mathbf{p}$ 为机器人当前位置坐标, $\mathbf{p} = [x, y]^T$ , $\mathbf{p}_{\text{goal}}$ 为目标点位置坐标.

传统人工势场法定义的排斥力势场函数为

$$U_{\text{rep}}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho_2 \leq \rho_0, \\ 0, & \rho_2 > \rho_0, \end{cases}$$

(3)

则相应的排斥力为

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{\text{rep}}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho_2^2} \frac{\partial \rho_2}{\partial \mathbf{p}}, & \rho_2 \leq \rho_0, \\ 0, & \rho_2 > \rho_0. \end{cases}$$

(4)

式(3),(4)中: $\eta$ 为大于零的斥力场系数; $\rho_2$ 为机器人和障碍物之间的欧氏距离, $\rho_2 = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{obs}}\|$ , $\mathbf{p}_{\text{obs}}$ 为障碍物质心的位置.

总势能表达式为

$$U = U_{\text{att}}(\mathbf{p}) + U_{\text{rep}}(\mathbf{p}).$$

(5)

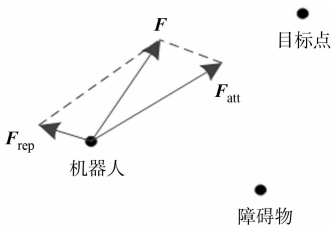


图 1 机器人受力分析  
Fig. 1 Force analysis of robot

机器人受到的合力为

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{p}) = \boldsymbol{F}_{\text{att}}(\boldsymbol{p}) + \boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{p}). \tag{6}$$

然而,在实际情况下,在机器人和目标位置之间,障碍物密集分布的区域会使其在某些位置所受的合力为零,导致机器人陷入局部极小值,此时,机器人不再向目标点移动,路径规划任务失败.

2 邻近障碍物整体化

2.1 障碍物分布情况分析

在传感器检测出障碍物位置信息的情况下,提出一种密集邻近障碍物整体化的方法,使机器人在可行区域内避开局部极小值陷阱,从而顺利到达目标位置.当机器人在前进过程中遇到密集邻近障碍物时,由于机器人所在的区域所受合力  $\boldsymbol{F}$  为零,导致其陷入其中徘徊不前.

密集邻近障碍物在机器人和目标点之间呈对称式分布的情形,如图 2(a)所示.机器人前进过程中,被密集邻近障碍物包围的情形,如图 2(b)所示.图 2 中:质点表示障碍物在地图中的位置;虚线圆为障碍物的影响范围,机器人在行走过程中不允许走进障碍物的影响范围.

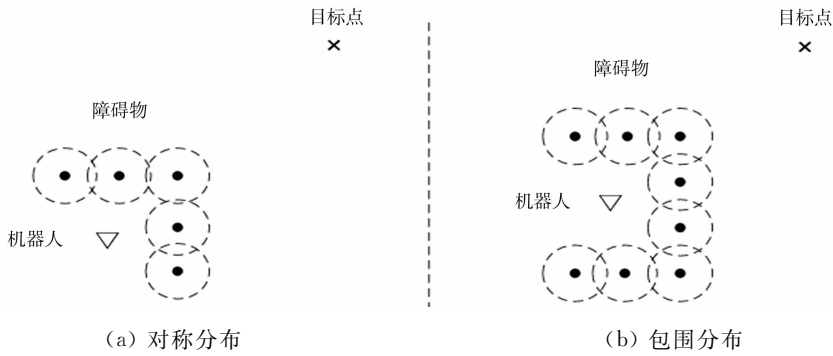


图 2 密集邻近障碍物区域图

Fig. 2 Distribution map of dense adjacent obstacles

密集邻近障碍物整体化就是在障碍物影响范围相邻或有重叠部分时,将这些障碍物进行整体化处理.这时,密集的障碍物区域被一个整体化障碍物替代,机器人在前进过程中只受到整体化障碍物的影响.该方法的步骤如下:首先,找出密集邻近的障碍物;然后,对不同的密集邻近障碍物进行区域划分;最后,对划分后的区域进行整体化,同时确定整体化障碍物的影响范围.

2.2 障碍物之间距离的计算

由于要找出密集邻近障碍物,并且划分出不同的密集区域,因此,首先需要确定障碍物之间的距离.障碍物距离计算示意图,如图 3 所示.图 3 中:  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  分别表示障碍物 1 和障碍物 2 在地图中的位置;  $d_{1,2}$  表示障碍物 1,2 之间的距离.

根据检测到的障碍物坐标信息,计算障碍物之间的距离,即

$$d_{1,2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \tag{7}$$

然后,计算障碍物 1 和障碍物 3,4,5 之间的距离.当障碍物 1 和所有障碍物之间的距离确定后,再计算障碍物 2 和障碍物 3,4,5 之间的距离.以此类推,计算所有障碍物之间的距离.如果这个距离小于等于 2 个障碍物最大影响范围半径之和,说明障碍物的影响范围相切或有重叠,此时,记录下这些符合条件的障碍物坐标信息,为下一步划分密集区域做准备.

2.3 障碍物密集区域的划分

仅根据障碍物之间的距离记录的坐标信息,并不能划分出密集邻近障碍物的分布区域.需要对记录下的障碍物坐标信息进行分析,具体有以下 6 个步骤.

步骤 1 任选一个障碍物坐标点作为迭代的起始点并标记.

步骤 2 利用式(7)计算和其他障碍物坐标点的欧氏距离,如果这个距离小于等于 2 个障碍物最大

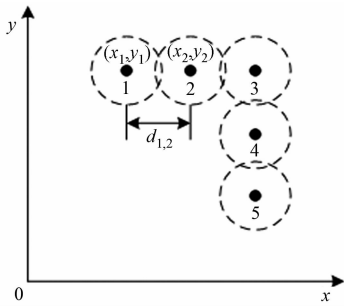


图 3 障碍物距离计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram for calculating obstacle distance

影响范围半径之和,即  $d \leq 2\rho_0$ , 则进行记录, 并和起始点作相同的标记; 否则, 跳转到步骤 4.

**步骤 3** 根据步骤 2 最新记录的坐标点, 再重复步骤 2, 直到没有符合距离条件的坐标点, 则本次标记结束.

**步骤 4** 任选一个剩下的坐标点作为迭代的起始点, 并作新的标记.

**步骤 5** 重复步骤 2, 3, 新一轮的标记结束.

**步骤 6** 重复步骤 4, 5, 直到所有的点均被标记.

上述步骤完成后, 所有的障碍物均被标记, 不同的标记代表不同区域的障碍物. 至此, 障碍物区域划分结束. 障碍物密集区域划分结果, 如图 4 所示.

2.4 障碍物密集区域整体化

根据上述分析, 首先, 对相同标记下障碍物的横、纵坐标进行比较, 找出横坐标的最大值  $x_{\max}$  和最小值  $x_{\min}$ , 纵坐标的最大值  $y_{\max}$  和最小值  $y_{\min}$ . 然后, 将最大值加上障碍物的影响范围  $x_{\max} + \rho_0, y_{\max} + \rho_0$ , 最小值减去障碍物的影响范围  $x_{\min} - \rho_0, y_{\min} - \rho_0$ . 对于环境中大小不同的障碍物, 只需修改对应的  $\rho_0$  值即可.

这 4 个坐标确定了密集邻近障碍物区域的最小包围矩形, 计算最小包围矩形的中心, 即

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \\ y' &= \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}. \end{aligned} \right\}$$

(8)

计算矩形角点到该中心的距离, 有

$$\rho'_0 = \sqrt{\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} + \rho_0\right)^2 + \left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} + \rho_0\right)^2}.$$

(9)

最后, 以中心  $(x', y')$  为圆心,  $\rho'_0$  为半径, 确定整体障碍物.  $(x', y')$  表示整体化障碍物在地图中的位置,  $\rho'_0$  表示整体化障碍物的影响范围.

整体化后, 斥力势场函数为

$$U_{\text{rep}}(\boldsymbol{p}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho'_0} \right)^2, & \rho_2 \leq \rho'_0, \\ 0, & \rho_2 > \rho'_0. \end{cases}$$

(10)

相邻障碍物整体化示意图, 如图 5 所示. 图 5 中:  $\rho'_0, \rho'_1$  分别表示不同的整体化障碍物影响范围; 虚线矩形为最小包围矩形. 此时, 容易形成局部极小值的区域被包含在整体化障碍物的影响范围之内, 达到消除局部极小值的目的.

计算整体化后所有障碍物两两之间的距离. 如果整体化障碍物中心之间的距离小于等于 2 个整体化障碍物影响范围半径之和, 即  $d \leq \rho'_0 + \rho'_1$ , 那么, 整体化障碍物之间可能会出现新的凹陷区域, 形成新的局部极小值陷阱, 此时, 在可行区域内接着进行密集区域的划分和障碍物整体化的处理, 以消除局部极小值陷阱; 否则, 整体化完成.

当环境中障碍物密集分布区域较多时, 在继续进行整体化处理后, 可能最终导致整个空间都是一个大的整体障碍物, 甚至目标位置也在整体障碍物影响范围之内, 这将导致机器人无路可走. 针对该问题的解决方案是先进行障碍物整体化处理, 然后, 在整体化障碍物影响范围的边缘, 沿着机器人前进的方向设置一系列子目标点, 进行引导, 使机器人摆脱局部极小值陷阱, 找到合适路径到达目标点.

在检测到障碍物坐标信息的情况下, 首先, 计算障碍物之间的距离; 然后, 根据距离信息划分出不同

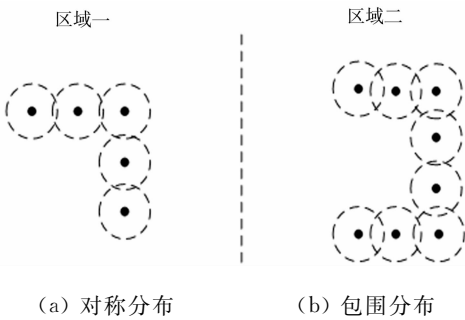


图 4 障碍物密集区域划分  
Fig. 4 Distribution of obstacle-intensive areas

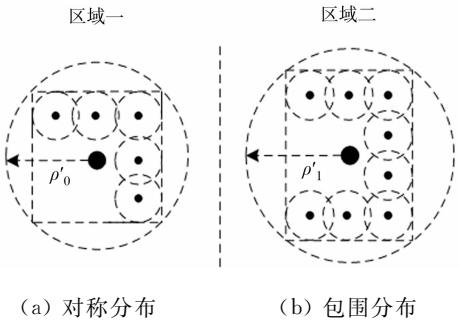


图 5 相邻障碍物整体化  
Fig. 5 Integration of adjacent obstacles

的密集相邻障碍物区域;接着,对密集区域进行整体化;最后,用整体化障碍物替代原本的多个障碍物.此时,机器人在前进过程中只需计算整体化障碍物的排斥作用,解决了局部区域中多个障碍物在多个方向上产生的排斥作用和引力作用相互抵消的问题.环境中障碍物密集分布区域较多是文中讨论的一种极端情况.

### 3 仿真实验与结果分析

在 MATLAB 软件平台上,对传统人工势场法、增设引导点的方法<sup>[18]</sup>和文中方法进行仿真,并对后两种方法的用时进行对比.

设置移动机器人在一个  $10\times 10$  的二维方形可行区域内移动,空间中有 10 个障碍物,单个障碍物的影响范围  $\rho_0$  设置为 0.5,对于整体障碍物,需要根据最小包围矩形计算其影响范围.传统人工势场法的路径规划效果图,如图 6 所示.图 6 中:点(0,0)是机器人的起始点;点(10,10)是目标点;圆点表示障碍物的位置;圆圈表示单个障碍物的影响范围,圆圈的重叠部分表示障碍物的影响范围重叠;一系列倒三角形表示机器人行走的轨迹.传统人工势场法存在局部极小值的问题,当机器人的速度方程存在包围型障碍物时,容易导致机器人陷入其中徘徊不前.

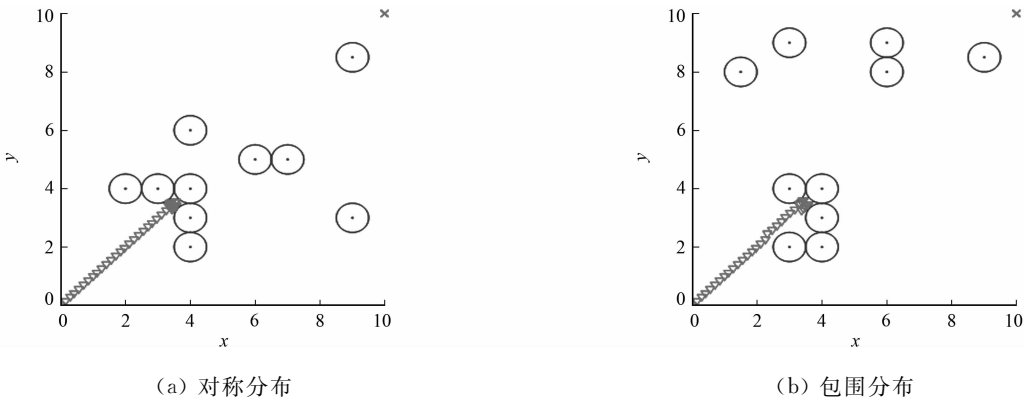


图 6 传统人工势场法的路径规划效果图

Fig. 6 Effective map of traditional artificial potential field method for path planning

由图 6 可知:当机器人在前进过程中被障碍物包围时,机器人受到的合力在包围区域的某些位置为零,机器人在这些位置或停留或徘徊不前,最终导致路径规划任务失败.

通过增设引导点,使机器人摆脱局部极小值到达目标位置<sup>[18]</sup>,其路径规划效果图,如图 7 所示.由图 7 可知:机器人在陷入局部极小值之后,需要通过增设引导点,引导机器人走出局部极小值.增设引导点的方法需要先检测机器人是否陷入局部极小值陷阱;然后,增设引导点对机器人进行引导;最后,当机器人走出陷阱时,再去除引导点,向目标点移动.然而,该方法占用太多的计算时间,效率不高.

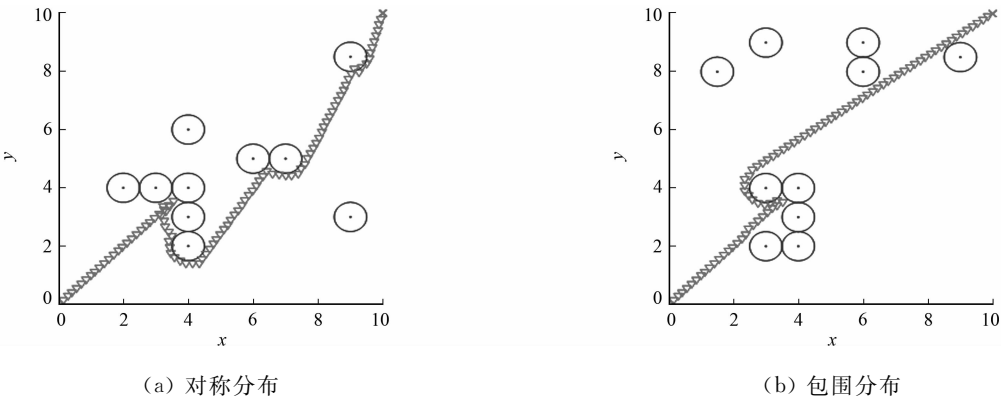


图 7 增设引导点路径规划效果图

Fig. 7 Effective map of add guidance point for path planning

根据文中提出的障碍物整体化路径规划方法,进行仿真实验,结果如图 8 所示.图 8 中:2 个大圆圈

表示整体化之后障碍物及其影响范围. 由图 8 可知:判断出 2 个障碍物的影响范围相切或相交, 就进行整体化处理. 由于密集邻近的障碍物被整体化障碍物替代, 整体化障碍物包含了密集区域存在的局部极小值区域, 机器人前进过程中能够有效避开这些区域, 从而避免了局部极小值问题, 最终顺利完成路径规划任务, 实验结果证明了文中方法的可行性.

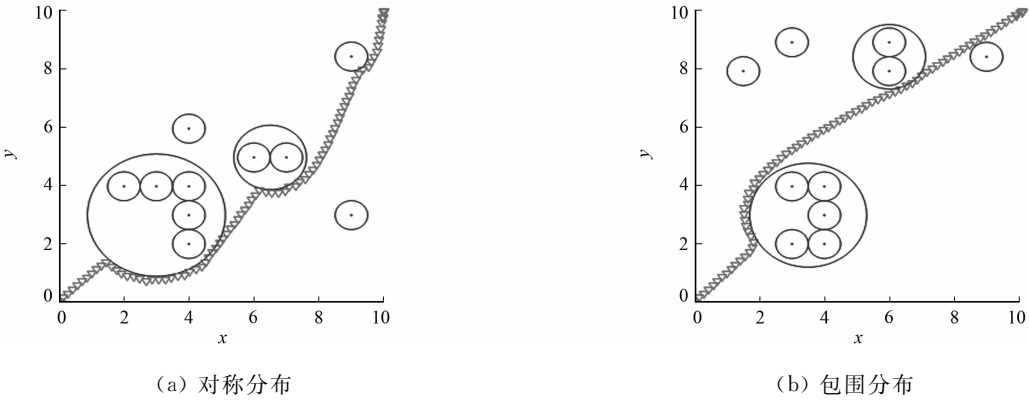


图 8 障碍物整体化路径规划效果图

Fig. 8 Effective map of integrated obstacles for path planning

研究表明:当机器人行走至障碍物密集分布的区域时,由于密集障碍物区域容易形成局部极小值,传统人工势场法只计算机器人受到的斥力和引力,又因为机器人受前进步长的限制,故机器人无法准确地停留在合力为零的位置,所以表现出在某一位置徘徊震荡的现象,最终无法引导机器人到达目标位置,而障碍物整体化的方法能够确保机器人顺利到达目标位置.

同时,对当检测到机器人陷入局部极小值之后,比较增设引导点使其摆脱局部极小值陷阱的方法和文中方法的用时. 由计算结果可知:机器人通过密集邻近障碍物的对称式分布和包围式分布时,其增设引导点的用时分别为 6.7,5.8 s,而障碍局部物整体化用时分别为 5.3,4.9 s.

以上实验均是从程序第一行到程序最后一行进行的用时记录,通过用时对比可知,文中提出的方法在两种情形下的用时均少于增设引导点方法的用时,表明了文中方法的高效性.

4 结束语

针对传统人工势场法存在的局部极小值问题,基于检测到障碍物位置信息的情况下,提出一种密集邻近障碍物整体化的方法. 整体化障碍物替代了原先的多个密集邻近障碍物,机器人在前进过程中只计算整体障碍物的影响,忽略了原先多个密集邻近的障碍物,从而避免了密集邻近障碍物区域对机器人形成的局部极小值问题. 该方法使机器人在前进过程中不再陷入局部极小值,也不需要额外设置引导点使其摆脱极小值陷阱,同时,减少了机器人对密集区域多个障碍物斥力的计算,提高了路径规划的效率. 在 MATLAB 仿真平台上对该方法进行验证,结果证明了其可行性和高效性.

参考文献:

[1] 黄超,林锦国,李俊. 导购机器人导航与控制系统的设计[J]. 微计算机信息,2008,24(6):39-41. DOI:10. 3969/j. issn. 1008-0570. 2008. 16. 017.

[2] 张超. 智能清扫机器人设计及其路径规划的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[3] 柳在鑫,王进戈,朱维兵,等. 双圆弧优化算法的足球机器人路径规划[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2008,29(2):190-193. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2008. 02. 0190.

[4] 殷路,尹怡欣. 基于动态人工势场法的路径规划仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(11):3325-3341.

[5] 吴正平,唐念,陈永亮,等. 基于改进人工势场法的 AUV 路径规划[J]. 化工自动化及仪表,2014,41(12):1421-1423. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-3932. 2014. 12. 021.

[6] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for robot manipulator and mobile robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis:IEEE Press,1985:396-397. DOI:10. 1109/ROBOT. 1985. 1087247.

[7] 邓学强. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2014,28(1):38-41.

- DOI:10.13367/j.cnki.sdgc.2014.01.010.
- [8] BUNIYAMIN N,SARIFF N B,WAN NGAH W A J,*et al.* Robot global path planning overview and a variation of ant colony system algorithm[J]. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation,2011,5(1):9-16.
- [9] 杨杰,贺利乐,李荣丽,等.基于改进势场栅格法的移动机器人路径规划[J].煤矿机械,2012,33(8):74-76. DOI:10.3969/j.issn.1003-0794.2012.08.035.
- [10] 吕太之,周武,赵春霞.采用粒子群优化和B样条曲线的改进可视图路径规划算法[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(1):103-108. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702101.
- [11] 刘钰,陆建峰,蔡海舟.基于改进A\*算法的机器人路径规划方法研究[J].计算机技术与发展,2012,22(12):108-111.
- [12] 张殿富,刘福.基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J].计算机工程与科学,2013,36(6):88-95. DOI:10.3969/j.issn.1007-130X.2013.06.015.
- [13] 李国进,陈武,易巧.基于改进人工势场法的移动机器人导航控制[J].计算技术与自动化,2017,36(1):52-56. DOI:10.3969/j.issn.1003-6199.2017.01.011.
- [14] FAZLI S,KLEEMAN L. Wall following and obstacle avoidance result from a multi-DSP sonar ring on a mobile robot[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Niagara Falls:IEEE Press,2005:432-437. DOI:10.1109/ICMA.2005.1626586.
- [15] 程拥强,蒋平,朱劲.用势场法改进的极限环导航方法在移动机器人中的应用[J].机器人,2004,26(2):133-138. DOI:10.3321/j.issn:1002-0446.2004.02.009.
- [16] 徐飞.基于改进人工势场法的机器人避障及路径规划研究[J].计算机科学,2016,43(12):293-296. DOI:10.11896/j.issn.1002-137X.2016.12.054.
- [17] 罗乾又,张华,王姮,等.改进人工势场法在机器人路径规划中的应用[J].计算机工程与设计,2011,32(4):1411-1413.
- [18] 刘传领,梁咏梅,杨静宇.复杂环境下解决势场法局部极小问题的路径规划方法[J].哈尔滨理工大学学报,2012,17(4):78-82. DOI:10.3969/j.issn.1007-2683.2012.04.014.
- [19] 宋建辉,代涛,刘砚菊.基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J].计算机工程与科学,2017,39(7):1328-1332. DOI:10.3969/j.issn.1007-130X.2017.07.019.
- [20] 王萌,王晓荣,李春贵.改进人工势场法的移动机器人路径规划研究[J].计算机工程与设计,2008,29(6):1504-1506.
- [21] SFEIR J,SAAD M,SALIAH-HASSANE H. An improved artificial potential field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment[C]//IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments. Montreal:IEEE Press,2011:208-213. DOI:10.1109/ROSE.2011.6058518.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)