



计算机仿真

Computer Simulation

ISSN 1006-9348, CN 11-3724/TP

《计算机仿真》网络首发论文

题目： 捡球机器人路径规划算法研究及仿真
作者： 陈卫，邓志良
网络首发日期： 2019-11-13
引用格式： 陈卫，邓志良. 捡球机器人路径规划算法研究及仿真. 计算机仿真.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20191113.0954.010.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

捡球机器人路径规划算法研究及仿真

陈 卫, 邓志良

(江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 基于捡球机器人视野范围有限的特点, 采用分层规划思想对全局进行窗口划分, 在每个窗口内采用蚁群算法对窗口内球体进行多目标路径规划, Matlab 仿真结果表明在机器人搜索完全局后虽不能实现全局最优, 但接近全局最优且对捡球机器人的特点具有较强适用性。针对捡球机器人工作动态环境, 在传统人工势场法基础上引入机器人与障碍物的相对速度因素, 对势场力角度进行调整, 并加入自适应步长。仿真结果表明, 上述算法解决了机器人在特殊位置关系下不可到达目标点和避障轨迹不平滑问题, 使机器人更快摆脱障碍物的影响。

关键词: 捡球机器人; 路径规划; 蚁群算法; 人工势场法

中图分类号: TP242

文献标识码: B

Research and Simulation of Path Planning Algorithm for Ball Picking Robot

CHEN Wei, DENG Zhi-liang

(School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

ABSTRACT: Based on the limited field of vision of ball-picking robot, a hierarchical planning idea is used to divide the global window, in each window, ant colony algorithm is adopted to carry out multi-objective path planning for the balls in the Windows, Matlab simulation results show that although the global optimization cannot be achieved after the robot search is complete, it is close to the global optimization and has strong applicability to the characteristics of the ball-picking robot. Aiming at dynamic working environment of ball -picking robot, based on the traditional artificial potential field method, the relative velocity between robot and obstacle is introduced, the angle of potential field force is adjusted, and add the adaptive step size, Matlab simulation results show that this algorithm can solve the problem of inaccessible target point of robot under special position relationship and the problem of obstacle avoidance trajectory is not smooth, and robots can get rid of obstacles faster.

KEYWORDS: Ball -picking robot; Path planning; Ant colony algorithm; Artificial potential field method

1 引言

捡球机器人能够很好地代替人去进行繁杂的捡球动作。当捡球机器人采用自身的视觉系统捕获球体目标及感知环境时, 受限于自身有限的视野范围, 在进行路径规划时捡球机器人不能规划出全局最优路径。且捡球机器人的工作环境是动态的, 在捡球机器人的工作过程中, 不仅要避开静态障碍物, 还要避开不断移动的动态障碍物。本文针对捡球机器人实际工作环境中路径规划问题, 进行如下两个工作:

1) 全局多目标路径规划;

2) 对动态障碍物避障。

2 多目标路径规划

2.1 问题描述

假设球场中有 n 个目标球体。其中 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, \dots, c_n\}$ 是其顶点集, $d(c_i, c_j)$ 表示任意两点 $c_i, c_j (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 之间的距离长度。求取捡球机器人最短路径问题可转化为对集合 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ 一个访问顺序为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n\}$, $t_i \in C$, $i = (1, 2, 3, \dots, n)$, 使 $L = \sum_{i=1}^n d_{t_i, t_{i+1}}$ 为最小值^[1]。

2.2 算法描述

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61502240, 61502096, 61304205, 61203316, 61663027);
江苏省自然科学基金项目 (BK20141002, BK20150634)

由于机器人视觉系统的视野范围有限，机器人不可能对全局目标做路径规划。本文采用分层规划的思想^[2]，对全局划分窗口，在每个窗口内采用蚁群算法^[3]对窗口内的多个球体目标进行路径规划^[4]，实现窗口内路径最优。

2.2.1 局部多目标路径规划

1)初始化参数

计算之初对蚁群数量 m 、信息素重要程度因子 α 、启发函数重要程度因子 β 、信息素挥发因子 ρ 、信息素释放总量 Q 、最大迭代次数 $iter_max$ 、迭代次数初始值 $iter$ ，进行初始化操作。

2)构建解空间

本文应用的场景起点为离机器人最近的球体，终点为离机器人最远的球体。对每个蚂蚁 $k(k = 1, 2, \dots, n)$ ，按照 $P_{ij}^k(t)$ 选择下一个待移动到球体，直至移动搜索完所有球体。 $P_{ij}^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 从球 i 转移到球 j 的概率，其公式为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allow_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta}, & s \in allow_k \\ 0, & s \notin allow_k \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻球 i 和球 j 之间的信息素量， $allow_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$ ，为蚂蚁 k 待选择的球体的集合， $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数， $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ 表示蚂蚁从球 i 转移到球 j 的期望度， d_{ij} 表示球 i 到球 j 之间的距离， α 为信息素重要程度因子， β 为启发函数重要程度因子。

3)更新信息素

在蚂蚁释放信息素的同时，各个球体连接路径上的信息素逐渐消失，当所有蚂蚁完成一次循环后，根据式 (2) 对各个球体连接路径上的信息素浓度进行实时更新。

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \\ \Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{ij}^k \end{cases} \quad (2)$$

其中参数 $\rho (0 < \rho < 1)$ 为信息素挥发因子， $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻球 i 和球 j 之间的信息素量， $\Delta\tau_{ij}$ 表示所有蚂蚁在球 i 和球 j 连接路径上释放的信息素浓度之和， $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在球 i 和球 j 连接路径上释放的信息素浓度。

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 从球体 } i \text{ 移动到球体 } j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中 Q 表示蚂蚁循环一次信息素释放总量， L_k 表示蚂蚁 k 所经过的路径的长度。

4)判断是否终止

如果 $iter < iter_max$ ，则令 $iter = iter + 1$ ，清空蚂蚁经过的路径记录表，并返回步骤 2)，否则终止运算，输出最优解。

2.2.2 全局多目标路径规划

机器人在捡球过程中对未知区域按如图 1 所示进行 S 型往复行走。为避免对某一区域重复扫描，可对整个球场进行按图 2 所示进行网格划分。用二维数组 $F_{ab} = (a, b)$ 记录机器人所到的区域，其中 $a = \text{ceil}(Rob_x/R_1)$, $b = \text{ceil}((Rob_y/R_1))$ ， ceil 为向上取整函数， Rob_x 和 Rob_y 为机器人在以球场角落为原点，长和宽分别作为 x 轴和 y 轴坐标系中的横坐标和纵坐标。 $R_1 = (\sqrt{2}/2)R$, R 为机器人的视野半径，初始数组置为零。

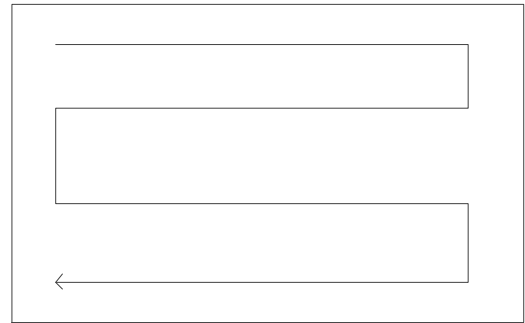


图 1 往复式前进方式行走

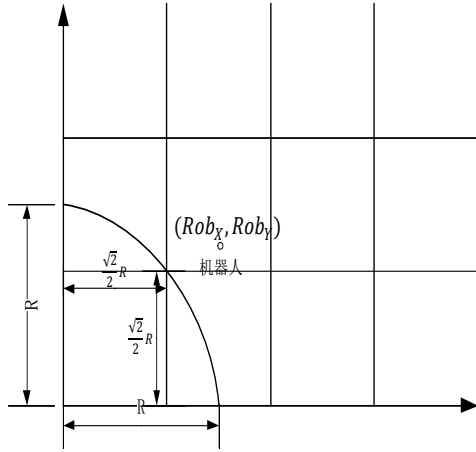


图 2 网格分割图

2.3 仿真研究

根据上文算法，在 Matlab 下进行路径仿真。仿真约定：仿真环境中，球场长和宽均为 10m， $R_1=5m$ ，空心圆表示球场中散落的球体，机器人的由起点所在窗口进行搜索。仿真结果如图 3 所示。从图 3 可看出，捡球机器人每个窗口中可以根据探测到局部信息进行局部最优路径规划。在全局环境未知时，该算法虽然不能实现全局最优，但却实现全局接近最优，且针对捡球机器人自身视觉系统只能探测到局部信息的特点，具有较强适用性。

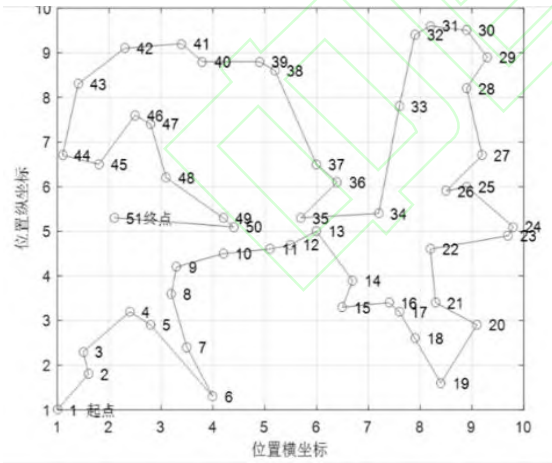


图 3 全局多目标路径规划仿真结果

3 动态环境下避障研究

3.1 传统人工势场法

人工势场法是由 Khatib^[6]提出的一种虚拟力法。传统人工势场法的势能函数是由引力势

场和斥力势场两部分组成。机器人与障碍物形成排斥作用的斥力势场定义为

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right]^2, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 k_{rep} 为可调参数， d 为障碍物与机器人之间距离， d_0 为常数，表示障碍物对机器人影响的最大距离。

机器人所产生的斥力为

$$F_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right] \frac{1}{d^2}, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (5)$$

目标对机器人的引力势场函数可定义为

$$U_{att} = \frac{1}{2}k_{att}|X - X_h|^2 \quad (6)$$

其中 k_{att} 为可调参数， $|X - X_h|$ 为机器人与目标点之间的欧几里得距离。

目标点产生引力为

$$F_{att} = -k_{att}|X - X_h| \quad (7)$$

F_{rep} 和 F_{att} 的合力 F_{total} 为：

$$F_{total} = F_{rep} + F_{att} \quad (8)$$

合力 F_{total} 所指的方向即为机器人的运动方向。

3.2 基于动态障碍物改进人工势场法

捡球机器人在球场运动时，由于球场内人等动态障碍物的出现，整个环境是动态的。当机器人运用传统人工势场法对动态障碍物进行避障时，障碍物与机器人的相对速度过大时，会出现机器人与障碍物碰撞现象，当障碍物朝背离机器人方向运动时，障碍物对机器人没有威胁。因此在对动态障碍物进行避障时加入相对速度因素^[7]，使机器人在进行路径决策时避免出现不必要的避障行动或与障碍物相撞情况。

图 4 中机器人速度为 V_{ro} ，障碍物的速度为 V_{ob} ， V_{or} 为障碍物与机器人的相对速度， $V_{or} = V_{ob} - V_{ro}$ 。由图 4 可知当 $V_{or} < 0$ 时障碍物远离机器人，无需进行避障动作，当 $V_{or} \geq 0$ 时障碍

物朝向机器人运动，机器人需进行避障运动。由图4可知当 V_{or} 与障碍物和机器人之间的连线夹角 θ_1 越小时障碍物对机器人的威胁越大。

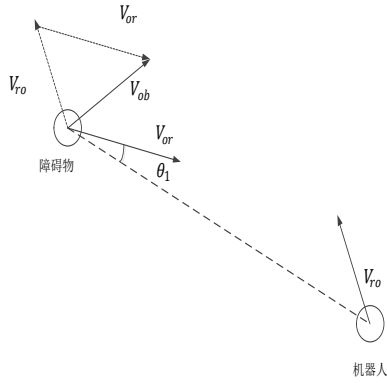


图4 机器人与障碍物的一种位置关系

引入障碍物与机器人相对速度因素改进后的斥力场函数为

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \mu k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right]^2 + \eta_1 V_{or} \cos \theta_1, & d \leq d_0 \text{ 且 } V_{or} \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $\mu = \lambda \cos \theta_1$ ， λ 为可调参数， θ_1 为障碍物与机器人的相对速度 V_{or} 与障碍物与机器人连线之间的夹角， η_1 为可调参数。

改进后的斥力为

$$F_{rep} = \begin{cases} \mu k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right] \frac{1}{d^2} + \eta_1 V_{or} \cos \theta_1, & d \leq d_0 \text{ 且 } V_{or} \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

3.2.1 改进后人工势场法的局限性

由式(10)可知 $F_{rep} = \mu k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right] \frac{1}{d^2} + \eta_1 V_{or} \cos \theta_1$ ，其中由障碍物产生斥力 $F_{rep1} = \mu k_{rep} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right] \frac{1}{d^2}$ ，由障碍物速度产生的斥力 $F_{repv} = \eta_1 V_{or} \cos \theta_1$ 。根据传统人工势场法，机器人的受力图如图5所示。 F_{rep1} 的方向定义为与障碍物和机器人的连线 L_{or} 相反^[8]， F_{repv} 的方向定义为与机器人的速度 V_{ro} 相反。

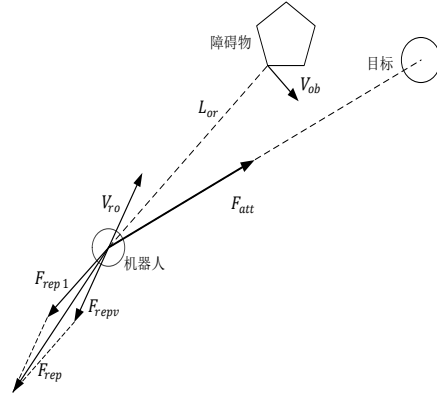


图5 未修改的势场力角度

根据上述的势场力角度的人工势场法，在实际避障过程中会出现因为特殊位置关系，使机器人难以到达目标点或者出现避障轨迹不平滑的问题。

设定机器人的初始位置坐标为(0,0)，初始速度为(0.05,0.05)。障碍物的初始位置坐标为(2.5,2.5)，初始速度(-0.05,-0.05)。目标位置坐标为(5,5)。所有的动作间隔 $T=0.1s$ ，避障过程如图6所示。从图6可以看出，当障碍物在机器人与目标点之间朝向机器人运动时，机器人在避障过程中会远离目标点。由式(10)和图5可知，在动态障碍物逐渐靠近机器人的过程中，合力 F_{total} 方向永远指向远离目标物的方向，因此机器人在避障过程也在远离目标点，产生机器人不可到达目标点问题。

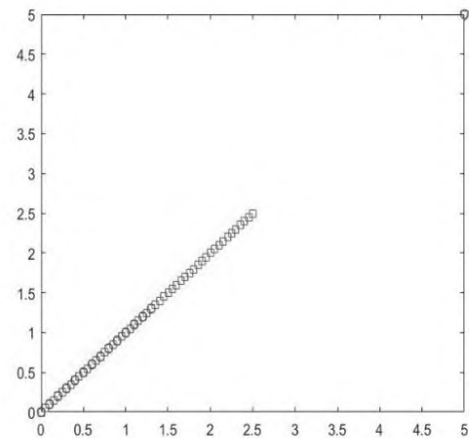


图6 未修改势场力角度避障仿真图

设定机器人的初始位置坐标为(0,0)，初始速度为(0.05,0.05)。障碍物的初始位置坐

标为 (5, 0)，初始速度 (0.05,-0.05)。目标位置坐标为 (5,5)。所有的动作间隔 $T=0.1s$ ，避障过程如图 7 所示。机器人在一段时间内做徘徊运动，直至障碍物远离对机器人影响范围时，机器人才继续朝向目标点运动。机器人虽然完成了避障动作但轨迹却不平滑。

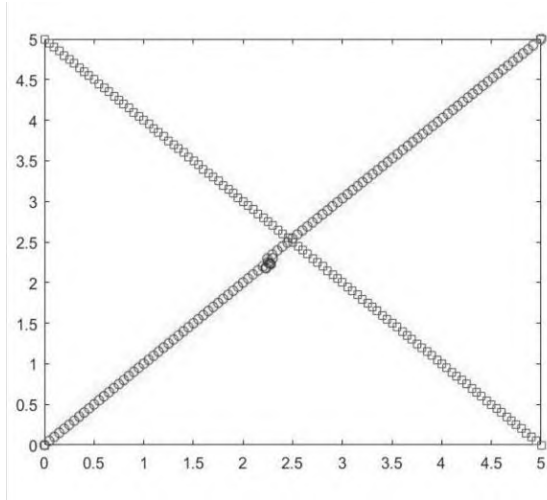


图 7 未修改势场力角度避障仿真图

3.2.2 修改势场力角度

针对因为机器人、障碍物、目标点三者之间特殊位置导致机器人不能到达目标点和运动轨迹不平滑问题，将 F_{rep1} 和 F_{repv} 的方向重新定义。重新定义后的 F_{rep1} 与机器人与障碍物的连线 L_{or} 垂直，其方向与障碍物的速度 V_{ob} 相反，重新定义后的 F_{repv} 与机器人的速度 V_{ro} 垂直，其方向同样与障碍物的速度 V_{ob} 相反，减小机器人在障碍物运动方向出现的可能性。重新定义后的机器人的受力情况如图 8 所示。

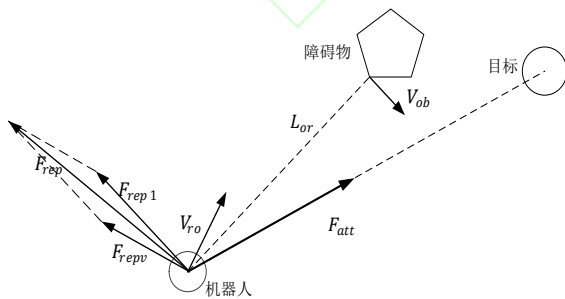


图 8 修改后势场力角度

仿真参数不变，根据修改后势场力角度进行避障的过程如图 9，图 10 所示。从仿真图可

知，机器人能够避开动态障碍物到目标点，且避障轨迹平滑。

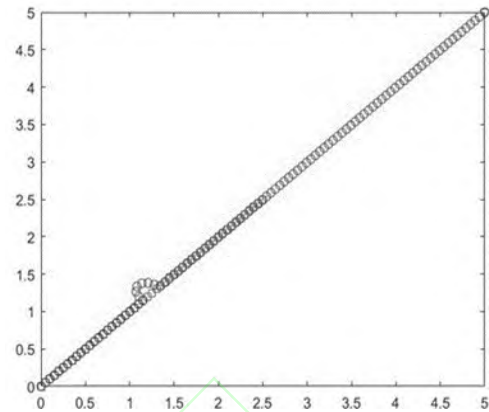


图 9 修改势场力角度后避障仿真图

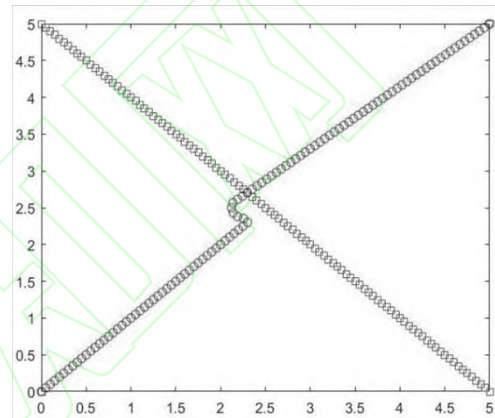


图 10 修改势场力角度后避障仿真图

3.3 自适应步长调整

在捡球机器人实际工作过程中，障碍物运动方向是时刻会发生变化，在捡球机器人工作过程中会出现需要紧急避障情况。假定某个时刻，障碍物离机器人的距离较近，障碍物与机器人的相对速度 $V_{or} < 0$ 。根据改进后的势场力函数式 (10) 可知，当 $V_{or} < 0$ ，即障碍物朝背离机器人方向运动时。虽然机器人与障碍物之间的距离较小，但此时障碍物对机器人无威胁，为提高捡球效率，机器人无需进行避障动作。当下个时刻机器人突然改变运动方向，朝向机器人运动时。由于机器人与障碍物之间的距离过小，如果障碍物与机器人之间的相对速度过大，如果按照机器人正常速度来进行避障操作，也会出现因为步长较小，不能及时躲避障碍物，从而出现与障碍物碰撞现象。

设定机器人的初始位置坐标为(0,0)，初始速度为(0.05, 0.05)。障碍物的初始位置坐标为(5,0)， $0s \leq t \leq 4.6s$ 时障碍物的速度(0, 0)， $4.7s \leq t \leq 5.2s$ 时障碍物的速度(0.05, 0.075)， $t \geq 5.3s$ 时障碍物的速度为(0.05, -0.15)，目标位置坐标为(5, 5)。所有的动作间隔 $T=0.1s$ ，机器人避障过程如图 11 所示。避碰点附近，机器人与障碍的距离如表 1 所示。通过图 11 和表 1 可知，在障碍物突然改变运动方向后，机器人虽然进行了避障动作，但是因为步长较小原因，避障过程与障碍物的距离过小。

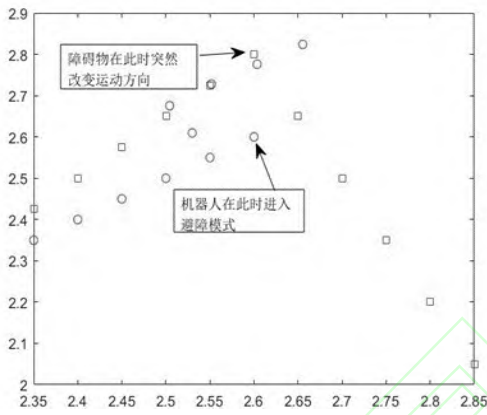


图 11 无自适应步长避障过程

表 1 机器人与障碍物的位置

机器人位置坐标	障碍物位置坐标	障碍物与机器人的距离
(2.60,2.60)	(2.60,2.80)	0.20
(2.53,2.61)	(2.65,2.65)	0.13
(2.50,2.68)	(2.70,2.50)	0.26
(2.55,2.73)	(2.75,2.35)	0.43

根据上诉问题，需根据障碍对机器人的威胁程度进行步长调整。由图 4 可知障碍物对机器人的威胁程度与障碍物与机器人之间的相对速度大小，障碍物与机器人之间的距离，障碍物与机器人之间的相对速度 V_{or} 与障碍物和机器人连线之间的夹角 θ_1 有关。可以把自适应调整的步长记为：

$$V_{ro} = \eta_2 V_{or} \cos \theta_1 \left(\frac{d_0}{d} \right)^n V \quad (11)$$

其中 η_2 为可调参数， V_{or} 为障碍物与机器人的相对速度， θ_1 为障碍物与机器人的相对速度 V_{or} 与障碍物与机器人连线之间的夹角， d_0 为常数，表示障碍物对机器人影响的最大距离， d 为障碍物与机器人之间距离， V 为机器人正常行驶时的速度。 $V \leq V_{ro} \leq V_{max}$ ， V_{max} 为机器人的最大速度。

改进自适应步长后机器人避障过程如图 12 所示。避碰点附近，机器人与障碍的距离如表 2 所示。通过图 11 和图 12，表 1 和表 2 对比可知。在加入自适应步长后，在需要紧急避障的情况下，机器人能更快的摆脱障碍物的影响。

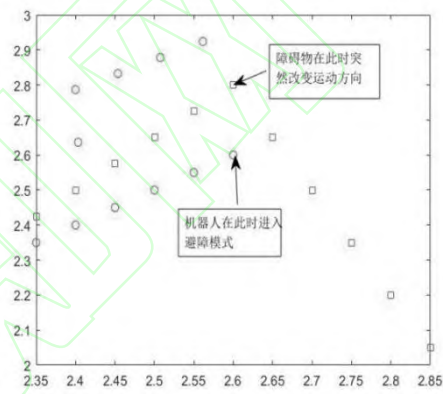


图 12 自适应步长避障过程

表 2 机器人与障碍物的位置

机器人位置坐标	障碍物位置坐标	障碍物与机器人的距离
(2.60,2.60)	(2.60,2.80)	0.20
(2.40,2.64)	(2.65,2.65)	0.25
(2.40,2.80)	(2.70,2.50)	0.42
(2.45,2.83)	(2.75,2.35)	0.57

4 捡球机器人全局路径规划

捡球机器人的全局路径规划流程如图 13 所示。捡球机器人沿着全局多目标路径规划算法规划出路径行走，此即为捡球机器人原始路径。在捡球机器人的行进过程中，通过视觉系统探测到周围的环境信息，包括动态障碍物的移动速度和方向等。当机器人探测到障碍物后，根据改进的人工势场法进行实时避障动作。

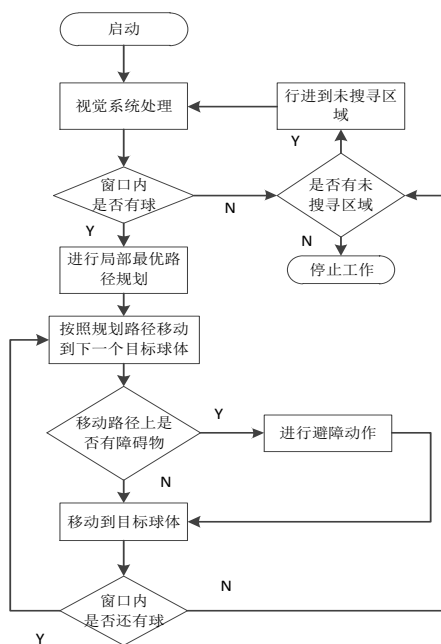


图 13 捡球机器人工作流程图

5 结论

本文根据捡球机器人的实际工作环境和其自身视觉系统视野范围有限的特点,采用分层规划方法提出一种基于捡球机器人的全局目标路径规划算法。针对其工作环境中出现的动态障碍物,通过引入相对速度,改进势场力方向,加入自适应步长对传统人工势场法进行改进,使机器人能够及时避开动态障碍物且避障轨迹平滑。该方法有效地提高了捡球机器人的工作效率,且能适用于球场中的动态工作环境。

参考文献:

[1] 袁豪. 旅行商问题的研究与应用[D]. 南京邮电大学, 2017.

- [2] 章超,李昀阳,杨思,白羽. 基于分层规划思想的无人机协同优化[J]. 北京建筑大学学报, 2018,34(1):70-75.
- [3] Tang B W , Zhu Z X , Fang Q , et al. Path Planning and Replanning for Intelligent Robot Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,390:495-499.
- [4] 喻环. 改进蚁群算法在机器人路径规划上的应用研究[D]. 安徽大学, 2017.
- [5] 征玉龙,言勇华. 视觉引导下的自主式捡球机器人多目标路径规划算法[J]. 机电一体化, 2006,(1):11-15.
- [6] Ge S S. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method[J]. Autonomous Robots, 2002,13.
- [7] 侯之旭. 动态环境下移动机器人实时避障研究[D]. 重庆理工大学, 2016.
- [8] 郭泉鹏. 基于改进人工势场法的路径规划算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.

[作者简介]

陈卫(1992-), 男(汉族), 江苏南通人,硕士研究生, 主要研究领域为机器人控制技术、智能控制。

邓志良(1962-), 男(汉族), 江苏武进人,教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为控制理论与控制工程。