

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.004

基于状态改变的机器人动态障碍物路径规划算法

晋玉强, 陈麒杰, 王陶昱
(海军航空大学岸防兵学院, 烟台, 264001)

摘要: 借鉴电路中, 电器元件对于外加激励, 状态发生改变, 同时在最短时间内恢复到初始状态的现象, 将动态障碍物的实时变化类比为外加激励, 提出一种基于状态改变的机器人动态障碍物路径规划算法。首先对机器人绕单个固定障碍物进行深入分析, 然后采用状态更新的方式, 对动态障碍物进行分析, 最后利用叠加法, 对存在动态障碍物和静态障碍物的混合任务规划区域进行分析, 并生成避障路径。为了验证算法在多障碍物环境的路径规划能力, 利用数值仿真模拟实验, 结果表明, 在该算法中, 机器人能够分别有效的实现静态障碍物区域、动态障碍物区域以及动静混合障碍物区域的路径规划。

关键词: 机器人; 路径规划; 动态障碍物; 状态改变; 克罗内克函数

中图分类号: TJ819; TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)06-0861-10

Path Planning Algorithm of Robot Dynamic Obstacles Based on State Change

JIN Yuqiang, CHEN Qijie, WANG Taoyu
(Coast Guard Academy, Naval Aviation University, Yantai, 264001, China)

Abstract: Referring to the phenomenon that the state of the electrical components changes when they are excited by an external force, and at the same time they return to the initial state with the shortest time, this paper compares the real-time change of the dynamic obstacles with the external force, and proposes a path planning algorithm of the dynamic obstacles robot based on the state change. First, the robot around a single fixed obstacle is analyzed in depth. Second, the dynamic obstacle is analyzed by the way of state update. Finally, the mixed task planning area with dynamic and static obstacles is analyzed by using the superposition method, and the obstacle avoidance path is generated. In order to verify the path planning ability of the algorithm in multi-obstacle environment, the numerical simulation experiment is used. The results show that the robot can effectively realize the path planning of static obstacle area, dynamic obstacle area and dynamic static mixed obstacle area.

Key words: robot; path planning; dynamic obstacle; state change; Kronecker delta function

随着科学技术的不断进步和制造工艺的提高, 机器人在军事、运输、救援、商业、娱乐、农业等领域^[1-4]的应用越来越广泛, 而机器人在执行任务的过程中, 对于动态障碍物的避障要求也越来越高。动态障碍物的路径规划转件成为人们研究的热点问题。

动态环境下的机器人路径规划算法主要可以

分为经典路径规划^[5-9]和智能路径^[10-13]规划算法, 其中人工势场法作为一种简单高效的经典路径规划方法, 得到广泛的研究与应用。人工势场法在 1986 年首次提出^[14], 并将之应用于机械臂的避碰问题。Akishita 等人^[15]在改进该方法后, 将其应用于机器人的路径规划。该方法的优点是在提高时效性的同时, 有效降低了路径规划的难度, 但依然存

基金项目: 国防科技项目基金(F062102009)资助项目。

收稿日期: 2020-05-20; **修订日期:** 2020-11-09

通信作者: 陈麒杰, 男, 硕士研究生, E-mail: 12385792@qq.com。

引用格式: 晋玉强, 陈麒杰, 王陶昱. 基于状态改变的机器人动态障碍物路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 861-870. JIN Yuqiang, CHEN Qijie, WANG Taoyu. Path planning algorithm of robot dynamic obstacles based on state change[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 861-870.

在着路径规划效率低、实时性差和存在极小值问题。近年来,不同的学者对人工势场法进行改进^[15-19],但对于动态目标多利用时间窗口实现避障,这就要求提前获取任务区域的障碍物信息以及运动状态等,降低了规划的时效性,容易造成避障失败。

本文借鉴电路中出现外加激励时,元件状态发生改变,并且尽快恢复初始状态的现象,在保留人工势场法斥力的基础上,提出一种新的算法。将机器人从起始点到目标点的直线行驶状态作为初始状态,障碍物虚拟势场作为系统的外加激励,初始状态在外加激励的作用下做出反应,并尽快恢复初始状态,从规划上确保可能的最短路径。用障碍物斥力对机器人作用产生的加速度影响,通过克罗内克函数的判定,实时监测机器人的速度变化和障碍物的状态变化,保证机器人能够有效到达目标点,并在规划过程中,选择到目标点路径较短的方向旋转,保持机器人能够以尽可能短的路径避障。相比人工势场法,该算法整体上在确保全局性的同时,保证了算法的实时性,同时避免路径规划陷入极小值点或目标不可达。

1 航路规划问题描述

路径规划是指在已知起始点和目标点,以及部分障碍物的相对位置信息的情况下,根据任务条件、环境约束条件、机器自身性能等条件,规划一条从起始点到目标点、满足预设条件的行驶路线。假设机器人所在平面为 xoy 平面,空间中任一点的位置可表示为 (x,y) ,则由原点出发,空间任意一点为终点的向量可以表示为 $P=(x,y)$,机器人起始点的向量为 $P_0=(x_0,y_0)$,在任意时刻的位置为 $P_t=(x_t,y_t)$,目标点位置向量为 $P_g=(x_g,y_g)$ 。航路规划就是寻找有限个满足约束条件的航路点向量集合 $P_t=\{P_0,P_1,P_2,\dots,P_k,\dots,P_M\}$,依次相连各个航路点,得到行驶路径。

本文中为了简化模型条件,作出以下假设:

(1)平面内的障碍物信息,根据障碍物作用大小和斥力系数的不同,将其描述成不同大小的同心圆,如图1所示(其中OBS为障碍物)。设第 n 个障碍物在 t 时刻中心点向量为 $P_{OBSnt}=(x_{OBSnt},y_{OBSnt})$,障碍物半径为 r_n ,对机器人的斥力作用半径为 R_n 。障碍物平面位置方程为

$$\Gamma(P):(x-x_{OBSnt})^2+(y-y_{OBSnt})^2=r_n^2 \quad (1)$$

(2)运动平面内的障碍物位置可以通过机载传感器实时获得,障碍物之间不存在相互作用和

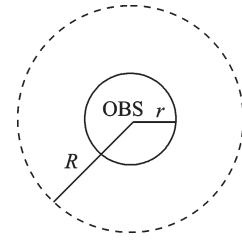


图1 障碍物示意图

Fig.1 Obstacle diagram

影响。

(3)机器人运动时,当前时刻的位置、速度、速度方向等量可以实时获得。

(4)机器人运动到距离目标点一定范围内时,就认为到达目标点。即当机器人到达目标点周围满足: $\|P_t P_g\| \leq \epsilon$ 时,判定机器人到达目标点(ϵ 为人为设定的判定参数)。

(5)假设机器人的质量为 1 kg ,直径为 d_v ,行进速度为固定的巡航速度 v_{UAV} ,且满足 $\|v_{UAV}\| \leq v_{max}$,其中 v_{max} 为机器性能决定的最大巡航速度。

2 基于状态改变的二维路径规划

2.1 基于状态改变的路径规划算法的特性分析

当电路如图2所示时,理想电感元件两端如图3,4中 $0\sim t_0$ 所示,当电路中电源电压变化后,两端电压变化如图4所示。

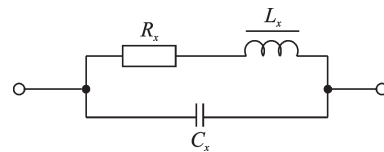


图2 单电感电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of single inductor circuit

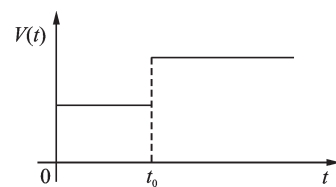


图3 理想电源电压随时间变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of ideal supply voltage changing with time

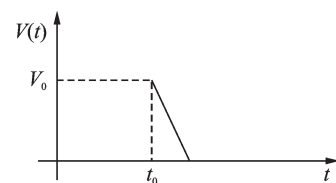


图4 电感元件两端电压示意图

Fig.4 Schematic diagram of voltage at both ends of inductor

此时理想电感元件两端电压可以表示为

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 L 为电感大小。而当在 t_0 时刻电源电压稳定后,元件两端电压将按照该时刻切线方向恢复到稳定状态(图 3,4)。

而当多个理想电感元件串联时(图 5),在电感元件之间不存在磁场互耦的条件下,总电压满足^[20]

$$U_{eq} = \frac{di(t)}{dt} (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \quad (3)$$

借鉴理想电感电压变化的现象,将无人机向目标点运动的稳定状态类比为理想电路在电压稳定时的稳定状态;单个障碍物作用类比为电源电压变化后,电感产生感抗,电路状态发生改变时的状态;多个障碍物作用类比为电路中多个理想电感元件的状态叠加;避障状态类比为电源电压稳定后,电感两端电压以该点切线的方向恢复到稳定的状态。综上,基于状态改变的无人机路径规划算法可以表述为,将无人机向目标点运动的状态作为系统的稳定状态,当任务区域内出现障碍物时,无人机状态改变,由稳定状态变为避障状态,障碍物将对无人机产生切向加速度实现避障,最终恢复至由起始点向目标点前进的稳定状态。

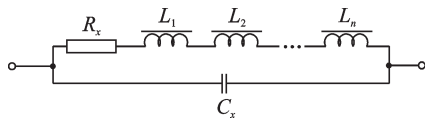


图 5 多电感电路示意图

Fig.5 Schematic diagram of multi inductance circuit

因此,机器人的路径规划,在没有障碍物时,可以看成没有外加激励的初始状态,机器人将按照从起始点到目标点的方向直线前进,当检测到运动路径上存在障碍物时,视为是对初始电路外加激励,系统需要在尽可能短的时间内恢复到初始状态,即恢复到从起始点到目标点的初始状态,表现为机器人将按照最短路径规划航路点。

如图 6 所示, AB 为障碍物与机器人前进方向平行的直径,虚线部分为障碍物斥力场作用范围。机器人在进入作用区域后,借鉴电路中理想元件在电压改变后,迅速恢复成初始状态的现象实施避障,机器人会沿着最短的路径进行避障,也就是 P 点处的切线方向,并且前进方向为该圆的上半部分,而不是路程较远的下半部分。由于机器人的速度方向始终有向目标方向的分量和避障的分量部分,因此,机器人始终不会陷入滞点。在遇到可能存在的滞点时,由于障碍物的作用,其本身的状态发生改变,算法能够根据状态的改变实时规划,逃

离该点。因此基于状态改变的路径规划方法的性质可以总结如下:

- (1) 在没有进入障碍物作用范围内时,机器人将保持初始的运动状态,沿直线向目标方向行进;
- (2) 进入障碍物作用范围后,机器人将按照实时更新的障碍物的状态实现避障;
- (3) 机器人在行驶过障碍物后,将沿着直线向目标点前进;
- (4) 根据状态改变实现的路径规划,不会陷入滞点和极小值点。

综上所述,基于状态改变的路径规划算法能够在理论上保证路径规划的最短,避免人工势场法的局部极小值和流函数的滞点问题,具有较好的避障性能。

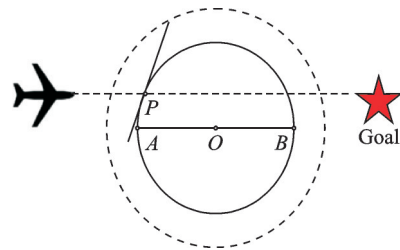


图 6 机器人状态改变示意图

Fig.6 Schematic diagram of robot state change

2.2 基于状态改变的路径规划方法

在二维平面中,机器人向目标点行进为一稳定的系统,每一个障碍物作用的叠加则是对该系统条件改变的外界激励,单系统最终尽快趋于稳定的结果,机器人会按照最短路径到达目标点。假设机器人在场内任意一点受到向量场的作用向目标点前进,得到机器人在任意一点由该点向目标点的方向向量为,即机器人初始的稳定方向状态

$$v_{goal} = \frac{P_t P_g}{\|P_t P_g\|} \quad (4)$$

当平面场内没有障碍物时,机器人将沿着由起点到终点的直线向量场前进,速度大小根据机器人本身的性能确定。

当平面内存在障碍物时候,机器人为了尽快恢复到初始的运动状态,会选择路径较短的方向,沿着障碍物边缘的切线与目标点方向夹角小于 90° 的方向,改变机器人的前进方向,达到避障的目的。由机器人和障碍物中心所在点可得障碍物方向向量为

$$v_{OBSn} = \frac{P_t P_{OBSn}}{\|P_t P_{OBSn}\|} \quad (5)$$

根据式(3)得障碍物切向量为

$$\mathbf{v}_\perp = \mathbf{v}_{\text{OBS}n} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

引入克罗内克函数^[21],该函数满足

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & i=0 \\ 0 & i \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

对于多障碍物存在时的行进平面内,定义第 n 个障碍物的影响系数为

$$\lambda_n = \begin{cases} \frac{1}{e^{\|\mathbf{PP}_{\text{OBS}n}\| - r_n}} & \|\mathbf{PP}_{\text{OBS}n}\| \leq R_n \\ 0 & \|\mathbf{PP}_{\text{OBS}n}\| > R_n \end{cases} \quad (8)$$

根据式(4)和(6)~(8)可以得到障碍物斥力作用为

$$\mathbf{F}_{\text{OBS}n} = \begin{cases} \mathbf{v}_\perp \cdot \left\{ \text{sign}\left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_\perp, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle\right) \right\} \cdot \delta \cdot \\ \left[\text{sign}\left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_\perp, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle\right) \right] \cdot \lambda_n & \|\mathbf{PP}_{\text{OBS}n}\| \leq R_n \\ 0 & \|\mathbf{PP}_{\text{OBS}n}\| > R_n \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)可以确定,改变障碍物作用半径,可以改变机器人避障时机,确保机器人的避障成功。根据式(9)可得 N 个障碍物对无人机的作用合力为

$$\mathbf{F}_{\text{OBSN}} = \sum_{n=1}^N \mathbf{F}_{\text{OBS}n} \quad (10)$$

则机器人的加速度为

$$\mathbf{a}_{\text{OBSN}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{OBSN}}}{m} \quad (11)$$

定义 t 时刻机器人速度向量为

$$\mathbf{v}_{\text{UAV}t} = (\dot{x}_t, \dot{y}_t) \quad (12)$$

根据式(4)和式(11)可得机器人在障碍物作用下的中间变化向量为

$$\mathbf{v}_F = \mathbf{v}_{\text{goal}} \cdot \left[\delta \left(\langle \mathbf{v}_{\text{goal}}, \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \rangle \right) + \delta \left(\|\mathbf{F}_{\text{OBSN}}\| \right) \right] + \mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t \quad (13)$$

根据机器人性能得最大转角为 α , 定义矩阵 T 为机器以最大转角逆时针转向的旋转矩阵

$$T = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)可得,矩阵 T 作用时,机器人将按照最大转角,逆时针旋转。

综上所述,机器人在 $t+1$ 时刻速度方程为

$$\mathbf{v}_{\text{UAV}(t+1)} = \frac{\left(\mathbf{v}_F + \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \cdot \delta \left(\langle \mathbf{v}_F, \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \rangle \right) \right) \cdot \left\| \mathbf{v}_F - \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \right\| \cdot T}{\left\| \mathbf{v}_F + \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \cdot \delta \left(\langle \mathbf{v}_F, \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \rangle \right) \right\| \cdot \left\| \mathbf{v}_F - \mathbf{v}_{\text{UAV}t} \right\| \cdot T} \cdot \left\| \mathbf{v}_{\text{UAV}} \right\| \quad (15)$$

式中 $\|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\|$ 为速度大小。

通过对速度量的积分,可以得到机器人的下一

个路径点

$$\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{P}_t + \mathbf{v}_{\text{UAV}(t+1)} \cdot \Delta t \quad (16)$$

式中 Δt 为计算步长。通过迭代,得到每一个步长下的位置点,通过将每一个路径点相连,可以得到机器人前进的最终路径。

3 避障分析

3.1 障碍物避障分析

单个障碍物时,选取圆形障碍物圆心位置为 $\mathbf{P}_{\text{OBS}} = (a, b)$, 半径为 r , 斥力作用半径为 R , 单个障碍物模型可化为

$$\Gamma: (x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (17)$$

根据式(15)可以得到,机器人运动分为两个状态,即直线运动状态,避障状态。

设无人机当前坐标为 $\mathbf{P}_t = (x_t, y_t)$, 则直线前进阶段

$$(\dot{x}_{t+1}, \dot{y}_{t+1}) = \frac{(x_g - x_t, y_g - y_t)}{\sqrt{(x_g - x_t)^2 + (y_g - y_t)^2}} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \quad (18)$$

当机器人首次进入障碍物作用范围时,其路径规划方程为

$$(\dot{x}_{t+1}, \dot{y}_{t+1}) = \frac{\frac{(x_g - x_t, y_g - y_t)}{\|\mathbf{P}_t \mathbf{P}_g\|} + \frac{[-(b - y_t), a - x_t]}{\|\mathbf{P}_t \mathbf{P}_{\text{OBS}n}\|} \cdot \lambda}{\left\| \frac{(x_g - x_t, y_g - y_t)}{\|\mathbf{P}_t \mathbf{P}_g\|} + \frac{[-(b - y_t), a - x_t]}{\|\mathbf{P}_t \mathbf{P}_{\text{OBS}n}\|} \cdot \lambda \right\|} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \quad (19)$$

所以当障碍物为静态障碍物时,机器人的运动方程为

$$(\dot{x}_{t+1}, \dot{y}_{t+1}) = \frac{[-(b - y_t), a - x_t] \cdot \lambda \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\|}{\|\mathbf{P}_t \mathbf{a}_{\text{OBS}n}\|} \quad (20)$$

而当障碍物为动态障碍物时,机器人的运动状态随着障碍物的运动状态而改变,运动方程为

$$(\dot{x}_{t+2}, \dot{y}_{t+2}) = \frac{\frac{(x_g - x_{t+1}, y_g - y_{t+1})}{\|\mathbf{P}_{t+1} \mathbf{P}_g\|} + \frac{[-(b - y_{t+1}), a - x_{t+1}]}{\|\mathbf{P}_{t+1} \mathbf{P}_{\text{OBS}n_{t+1}}\|} \cdot \lambda}{\left\| \frac{(x_g - x_{t+1}, y_g - y_{t+1})}{\|\mathbf{P}_{t+1} \mathbf{P}_g\|} + \frac{[-(b - y_{t+1}), a - x_{t+1}]}{\|\mathbf{P}_{t+1} \mathbf{P}_{\text{OBS}n_{t+1}}\|} \cdot \lambda \right\|} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \quad (21)$$

机器人避障成功,脱离避障区域后,其运动方程为

$$(\dot{x}_{t+1}, \dot{y}_{t+1}) = \frac{(x_g - x_t, y_g - y_t)}{\sqrt{(x_g - x_t)^2 + (y_g - y_t)^2}} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \quad (22)$$

由以上公式,可得机器人在避障前后的状态没

有改变,只有当进入避障区域内时,受到障碍物影响,其状态改变的情况下,实现避障。

3.2 驻点应对策略

人工势场避障法中,算法本身存在驻点,即路径不可规划点。流函数法中存在路径规划的滞点,即速度为 0 的点。本算法实质上是对人工势场法的拓展,假设机器人前进至目标点附近的路径规划为一个恒定的系统,采用克罗内克函数对无人机状态的变化作出判断,实现对障碍物影响输入的响应。以下将分情况进行讨论。

3.2.1 滞点假设分析

假设系统存在滞点,则输入速度为 0,同时输出为 0,即要求 $\mathbf{v}_{\text{UAV}_t} = (\dot{x}_t, \dot{y}_t) = (0, 0)$ 时, $\mathbf{v}_{\text{UAV}(t+1)} = (0, 0)$,设此时位置 $\mathbf{P}_t = (x_t, y_t)$,速度为 $(\dot{x}_t, \dot{y}_t) = (0, 0)$ 代入式(15)中,进行求解,可求得此时速度为

$$\mathbf{v}_{\text{UAV}(t+1)} = \frac{(\mathbf{v}_{\text{goal}} + \mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t)}{\|\mathbf{v}_{\text{goal}} + \mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t\|} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \quad (23)$$

由式(9)和(10)可得,速度变化向量 $\mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t$ 和向量 \mathbf{v}_{goal} 之间夹角

$$\begin{aligned} \cos\phi &= \frac{\mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}}}{\|\mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}}\|} = \\ &= \frac{\sum_{n=1}^N \mathbf{a}_{\text{OBSn}} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} \cdot \lambda_n}{\|\mathbf{a}_{\text{OBSN}} \cdot \Delta t \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}}\|} \quad (24) \end{aligned}$$

根据式(24), $\cos\phi \geq 0$ 成立,则 $0 < \phi \leq \frac{\pi}{2}$,所以式(23)中, $\mathbf{v}_{\text{UAV}(t+1)} \neq 0$ 成立,且在目标方向上存在同向分量。由以上可得,机器人在运动过程中,始终朝向目标方向。

3.2.2 极小值点应对策略

当机器人运行至对称障碍物,因为相同障碍物系数的作用,使得机器人避障失败。

由图 7 可得,机器人在运行至对称障碍物对称点时,因为产生的转向向量大小相等、方向相反,故造成机器人避障失败。

当机器人运行至如图 7 所示位置时,障碍物产

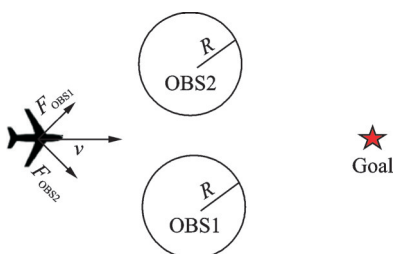


图 7 极小值点示意图

Fig.7 Diagram of minimum points

生的作用向量可由式(11)计算得到

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{OBS1}} &= \mathbf{v}_{\perp} \cdot \left\{ \text{sign} \left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_{\perp}, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle \right) + \right. \\ &\quad \left. \delta \left[\text{sign} \left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_{\perp}, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle \right) \right] \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

障碍物 2 产生的加速度影响

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{OBS2}} &= \mathbf{v}_{\perp} \cdot \left\{ \text{sign} \left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_{\perp}, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle \right) + \right. \\ &\quad \left. \delta \left[\text{sign} \left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{v}_{\perp}, \mathbf{v}_{\text{goal}} \rangle \right) \right] \right\} \quad (26) \end{aligned}$$

障碍物的影响系数为: $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{e^{\frac{\|PP_{\text{obs}}\|}{r}}}$ 。

由图 7 受力分析可得,障碍物产生的加速度方向关于机器人和目标连线对称。此时,机器人的加速度方向与目标方向相同,前进路径方向不变,若按照此时的规划方式,机器人将进入障碍区域避障失败。针对这种情况,本文中利用克罗内克函数,作为机器人状态改变的检测环节,将机器人状态的改变作为避障的时机。根据式(11),当目标方向与障碍物合作用方向共线时

$$\mathbf{v}_{F(t-1)} = \mathbf{v}_{\text{goal}} + \mathbf{a}_{\text{OBSN}} \quad (27)$$

根据式(22)和式(23)可得

$$\|\mathbf{a}_{\text{OBS1}}\| = \|\mathbf{a}_{\text{OBS2}}\| \quad (28)$$

$$\mathbf{v}_{F(t-1)} = \mathbf{v}_{\text{goal}} + \mathbf{a}_{\text{OBSN}} \quad (29)$$

$$\mathbf{a}_{\text{OBSN}} = \frac{\|\mathbf{a}_{\text{OBSN}}\|}{\|\mathbf{v}_{\text{goal}}\|} \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} \quad (30)$$

根据式(15)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\text{UAV}_t} &= \\ &= \frac{\left[\mathbf{v}_{F(t-1)} + \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)} \cdot \delta \left(\langle \mathbf{v}_F, \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)} \rangle \right) \cdot \|\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)}\| \cdot T \right]}{\left\| \mathbf{v}_{F(t-1)} + \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)} \cdot \delta \left(\langle \mathbf{v}_F, \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)} \rangle \right) \cdot \|\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)}\| \cdot T \right\|} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{UAV}}\| \end{aligned}$$

化简得

$$\mathbf{v}_{\text{UAV}_t} = \frac{(\mu \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} + \eta \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} \cdot T_2)}{\|\mu \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} + \eta \cdot \mathbf{v}_{\text{goal}} \cdot T_2\|} \quad (31)$$

根据式(31)可得,下一刻的无人机将按照最大转角作出避障动作,保证路径规划的可行性。式中 μ 和 η 满足

$$\mu = 1 + \frac{\|\mathbf{a}_{\text{OBSN}}\|}{\|\mathbf{v}_{\text{goal}}\|} \quad (32)$$

$$\eta = \frac{\|\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)}\|}{\|\mathbf{v}_{\text{UAV}(t-1)}\|} \quad (33)$$

综上所述,下面给出机器人在原点时,障碍物在不同位置的避障状态分析如图 8—13 所示:

- (1) 障碍物位于 X 轴正半轴;
- (2) 障碍物位于第一象限;

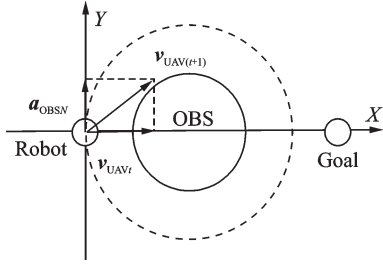


图8 障碍物位于X轴正半轴

Fig.8 A situation that the obstacle is on positive half of X axis

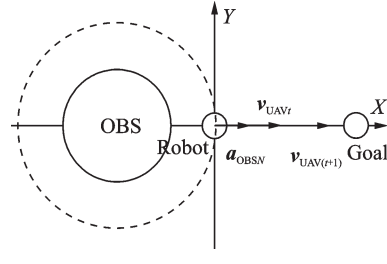


图12 障碍物位于X轴负半轴

Fig.12 A situation that the obstacle is on negative half of X axis

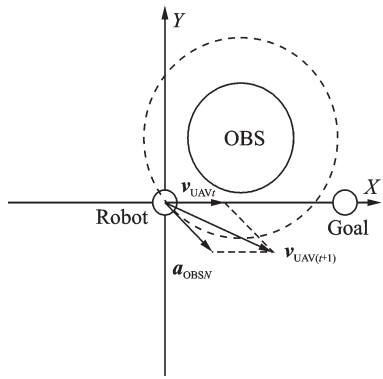


图9 障碍物位于第一象限

Fig.9 A situation that the obstacles are in the first quadrant

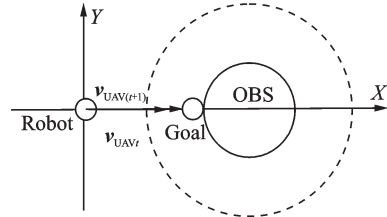


图13 障碍物位于X轴正半轴,且目标点位于机器人和目标点之间

Fig.13 A situation that the obstacle is located between the target and the X-axis of the robot

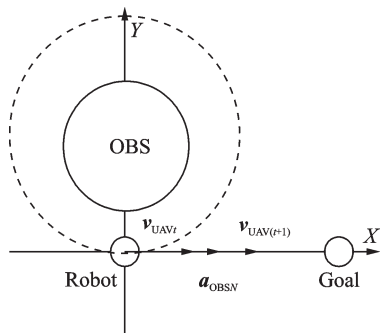


图10 障碍物位于Y轴正半轴

Fig.10 A situation that the obstacle is on positive half of Y axis

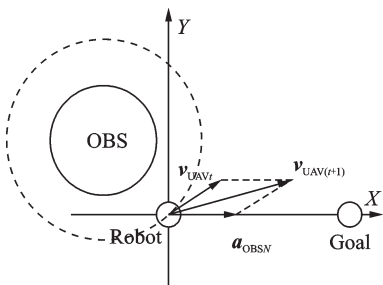


图11 障碍物位于第二象限

Fig.11 A situation that the obstacles are in the second quadrant

(6) 障碍物位于X轴正半轴,且目标点位于机器人和目标点之间。

其余障碍物位于第三象限、Y轴负半轴、第四象限情况分别与障碍物位于第二象限、Y轴正半轴、第一象限的情况关于X轴对称,此处不加赘述。

4 数值仿真

根据以上理论推导,在本文算法中,算法根据障碍物的状态更新机器人的状态,并实时检测机器人状态,避免陷入极小值点,实现路径规划,由此可得,算法的流程图如图14所示。

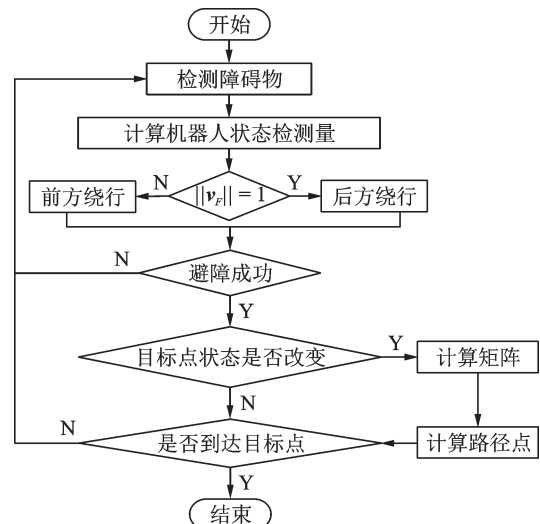


图14 基于状态改变的机器人路径规划算法流程图

Fig.14 Flow chart of robot path planning algorithm based on state change

- (3) 障碍物位于Y轴正半轴;
- (4) 障碍物位于第二象限;
- (5) 障碍物位于X轴负半轴;

利用 MATLAB 按照以上流程针对不同情况对算法进行仿真,仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation conditions

仿真条件	参数值
机器人直径/m	5
机器人速度/(m·s ⁻¹)	10
地图面积/(m×m)	2 000×2 000
起始点坐标	(0,1 000)
目标点坐标	(1 800,1 000)

4.1 单个障碍物仿真

设定障碍物条件如表 2 所示,分别对静态障碍物和动态障碍物分别进行仿真,得到结果如图 15—20 所示。

表 2 障碍物信息

Table 2 Obstacle information

位置信息	数值
静态障碍物位置	(700,1 000)
动态障碍物初始位置	(700,950)
实际半径/m	100
影响半径/m	200

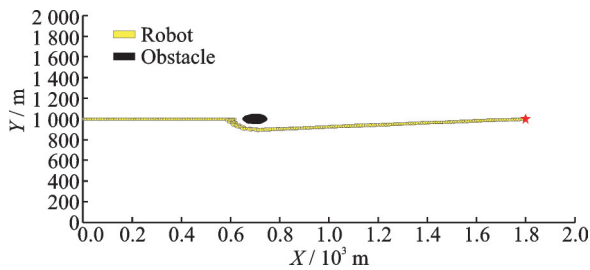


图 15 单个静态障碍物仿真结果

Fig.15 Simulation results of single static obstacle

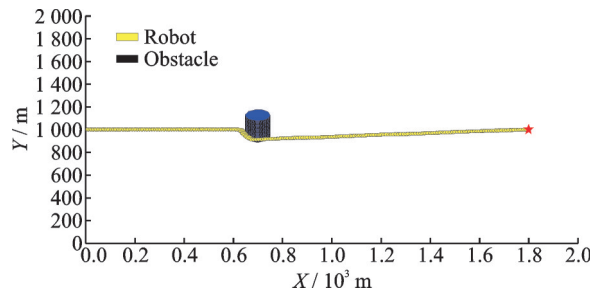


图 16 单个动态障碍物仿真结果

Fig.16 Simulation results of single dynamic obstacle

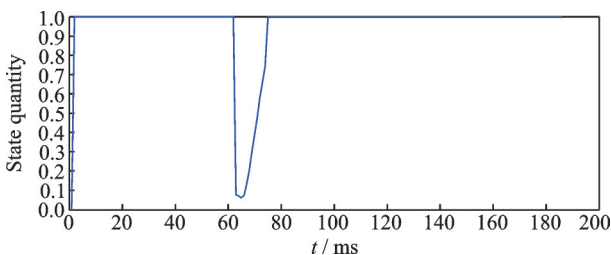


图 17 静态障碍物状态监测量 v_F 在 X 方向分量

Fig.17 Component of state detection quantity v_F of the static object in X direction

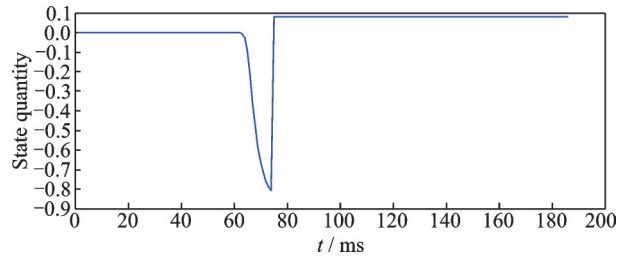


图 18 静态障碍物状态监测量 v_F 在 Y 方向分量

Fig.18 Component of state detection quantity v_F of the static object in Y direction

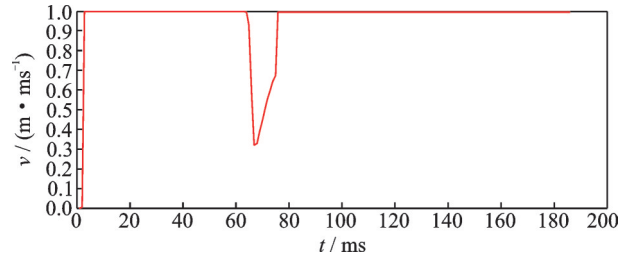


图 19 动态障碍物 X 方向速度变化

Fig.19 Variation of component velocity of the dynamic object in X direction

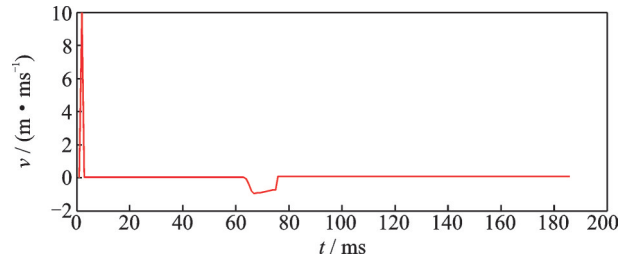


图 20 动态障碍物 Y 方向速度变化

Fig.20 Variation of component velocity of the dynamic object in Y direction

由图 17—20 可知:

(1)机器人在遇到动态障碍物(蓝色柱体,为障碍物运动轨迹,下同)后,状态变化随着障碍物的变化和影响而变化(图 17,18)。

(2)当机器人的状态受到障碍物影响发生变化时,状态检测量发生变化,从而使机器人的速度量也发生对应变化,完成避障(图 19,20)。

(3)在离开障碍物影响区域后,机器人的状态迅速恢复至初始状态。

4.2 极小值点问题仿真

设定对称障碍物信息如表 3 所示,仿真结果如图 21,22 所示。

表 3 对称障碍物信息

Table 3 Information of symmetry obstacles

障碍编号	障碍物位置
1	(900,850)
2	(900,1 150)
3	(1 200,875)
4	(1 200,1 125)
5	(1 600,1 000)

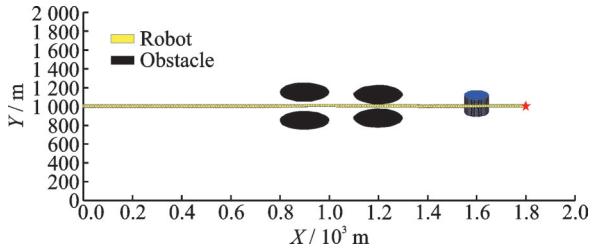


图21 极小值点仿真图

Fig.21 Simulation diagram of minimum point

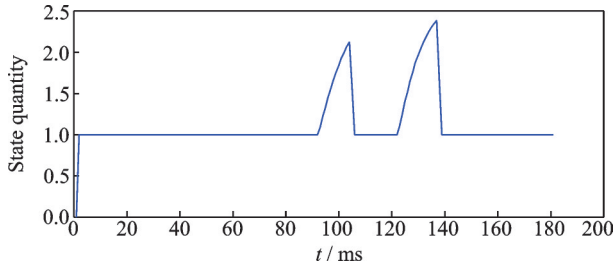


图22 对称障碍物状态监测量 v_F 在 X 方向分量

Fig.22 Component of state detection quantity v_F of the symmetric objects in X direction

由图23—25可得：

(1)机器人在对称障碍物区域内,受到障碍物的影响,状态发生变化,但速度在两个方向上变化量很小,保持着向目标点前进的状态。

(2)在5号障碍物附近时,机器人和目标点连线之间没有障碍物,但存在影响区域,机器人状态受到作用区域的影响,出现调整,同时调整机器人速度状态,但随后继续以直线向目标点前进。

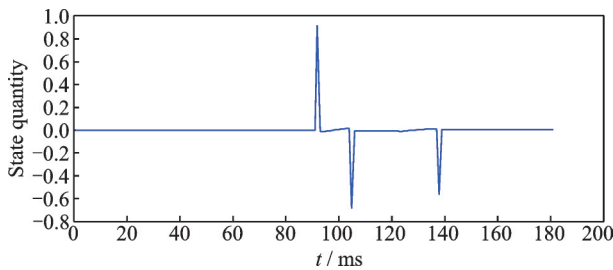


图23 对称障碍物状态监测量 v_F 在 Y 方向分量

Fig.23 Component of state detection quantity v_F of the symmetric objects in Y direction

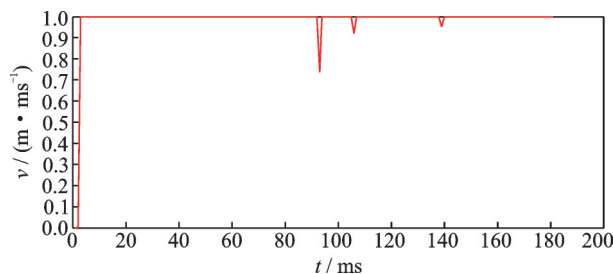


图24 对称障碍物 X 方向速度变化

Fig.24 Variation of component velocity of the symmetric objects in X direction

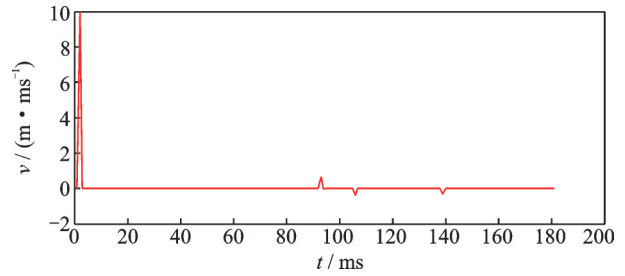


图25 对称障碍物 Y 方向速度变化

Fig.25 Variation of component velocity of the symmetric objects in Y direction

(3)在受到障碍物影响后,机器人速度能够按照状态变化实时调整,完成避障。

4.3 混合障碍物避障仿真

设定障碍物信息如表4所示,对多障碍物情况下的人工势场法和本文算法进行仿真。

表4 混合障碍物信息

Table 4 Information of mix obstacles

障碍编号	障碍物位置
1	(200,950)
2	(550,1150)
3	(900,950)
4	(1200,1000)
5	(1500,1000)

由图26—30可得：

(1)机器人能够在静态和动态障碍物的混合区域内完成路径规划,到达目标点。

(2)由图27,28可得,机器人在遇到障碍物后,状态能够随着障碍物的影响及时发生变化,在避障

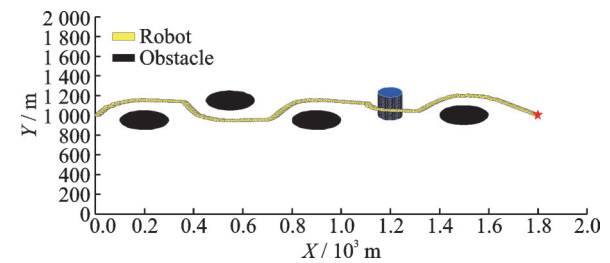


图26 混合障碍物仿真图

Fig.26 Simulation of mixed obstacles

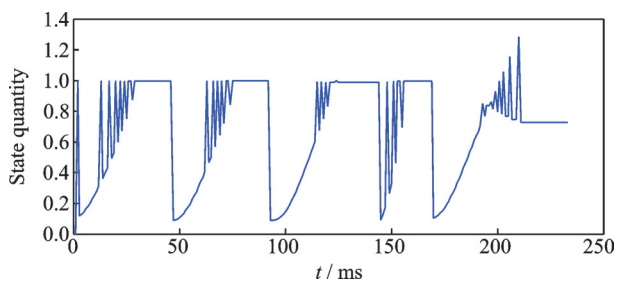


图27 混合障碍物状态监测量 v_F 在 X 方向分量

Fig.27 Component of state detection quantity v_F of the mixed objects in X direction

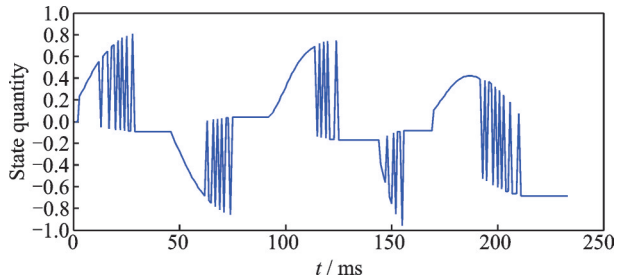
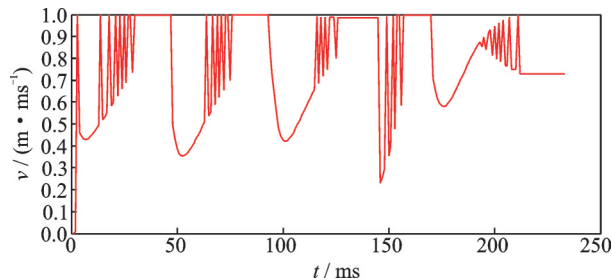
图28 混合障碍物状态监测量 v_F 在 Y 方向分量Fig.28 Component of state detection quantity v_F of the mixed objects in Y direction

图29 混合障碍物 X 方向速度变化

Fig.29 Variation of component velocity of the mixed objects in X direction

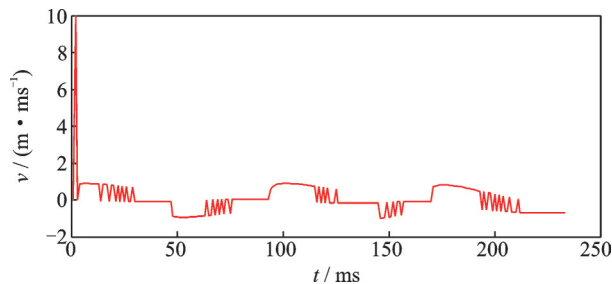


图30 混合障碍物 Y 方向速度变化

Fig.30 Variation of component velocity of the mixed objects in Y direction

后能够迅速恢复成初始状态。

(3)由图29,30可得,机器人的速度变化随着状态监测量在坐标上分量改变,且变化实时性较高。

5 结 论

借鉴电场中,电器元件遇到外加激励时,在最短时间内恢复到初始状态的现象,将动态障碍物类比为不断添加的外部激励,实现对机器人的状态控制,完成避障,通过理论推导,该算法能够有效的完成动态障碍物避障,同时能够有效避免极小值点。

仿真结果表明,本算法能够根据障碍物实时调整机器人的状态,避免极小值点,以最短路径完成混合任务区域内的避障。

参考文献:

- [1] 祁永强,李帅,李忠杰.基于改进人工势场法的井下救援机器人的路径规划研究[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2019,34(4):32-37.
QI Yongqiang, LI Shuai, LI Zhongjie. Research on path planning of underground rescue robot based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 32-37.
- [2] 刘亚京,吕文红,王国娟,等.末端无人物流路规划研究综述[J].物流技术,2019,38(6):135-140.
LIU Yajing, LYU Wenhong, WANG Guojuan, et al. Review of logistics path planning for terminal UAV [J]. Logistics Technology, 2019, 38(6): 135-140.
- [3] 范思儀,陈铭,丁念.基于流体扰动算法的农用植保无人机避障航路规划与仿真[J].农业工程技术,2018,38(9):51-54.
FAN Siyi, CHEN Ming, DING Nian. Obstacle avoidance path planning and Simulation of agricultural plant protection UAV based on fluid disturbance algorithm [J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(9): 51-54.
- [4] 郭蕴华,王晓宗.基于改进量子粒子群算法的无人机路径规划[J].船海工程,2016,45(1):99-102.
GUO Yunhua, WANG Xiaozong. UAV path planning based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Ship and Sea Engineering, 2016, 45(1): 99-102.
- [5] YAN F, LIU Y, XIAO J. Path planning in complex 3D environments using a probabilistic roadmap method [J]. International Journal of Automation and Computing, 2013, 10(6): 525-533.
- [6] 顾辰.改进的A*算法在机器人路径规划中的应用[J].电子设计工程,2014(19):96-98.
GU Chen. Application of improved A* algorithm in robot path planning[J]. Electronic Design Engineering, 2014(19): 96-98
- [7] 杨超.基于A*算法的移动机器人路径规划[J].电子技术与软件工程,2015,74(24):119.
YANG Chao. Path planning of mobile robot based on A* algorithm[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2015, 74(24): 119.
- [8] 甄然,甄士博,吴学礼.一种自适应控制的人工势场的无人机路径规划算法[J].无线电工程,2017,47(5):54-57.
ZHEN Ran, ZHEN Shibo, WU Xueli. A path planning algorithm for UAV based on adaptive control artificial potential field[J]. Radio Engineering, 2017, 47(5): 54-57.

- [9] 毛晨悦,吴鹏勇.基于人工势场法的无人机路径规划避障算法[J].电子科技,2019(7):1-7.
MAO Chenyue, WU Pengyong. Obstacle avoidance algorithm for UAV path planning based on artificial potential field method[J]. Electronic Science and Technology, 2019 (7): 1-7
- [10] 刘洋,章卫国,李广文,等.动态环境中的无人机路径规划方法[J].北京航空航天大学学报,2014,40(2):252-256.
LIU Yang, ZHANG Weiguo, LI Guangwen, et al. UAV path planning method in dynamic environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 252-256.
- [11] 曹其新,黄先群,蒋宇捷,等.动态环境中移动机器人多状态转换自主导航[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):22-27.
CAO Qixin, HUANG Xianqun, JIANG Yujie, et al. Multi state transition autonomous navigation of mobile robot in dynamic environment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 22-27.
- [12] 屈鸿,黄利伟,柯星.动态环境下基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J].电子科技大学学报,2015(2):260-265.
QU Hong, HUANG Liwei, KE Xing. Research on robot path planning based on improved ant colony algorithm in dynamic environment[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015(2): 260-265.
- [13] 梁凯,毛剑琳.动态环境下基于改进蚁群算法的路径规划研究[J].电子测量技术,2020,43(1):57-62.
LIANG Kai, MAO Jianlin. Path planning based on improved ant colony algorithm in dynamic environment [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (1): 57-62.
- [14] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance system for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [15] AKISHITA S, KAWAMURA S, HISANOBU T. Velocity potential approach to path planning for avoiding moving obstacles[J]. Advanced Robotics, 1992, 7 (5): 463-478.
- [16] 田子建,高学浩,张梦霞.基于改进人工势场的矿井导航装置路径规划[J].煤炭学报,2016,41(S2):589-597.
TIAN Zijian, GAO Xuehao, ZHANG Mengxia. Path planning of mine navigation device based on improved artificial potential field[J]. Acta Coal Sinica, 2016, 41 (S2): 589-597.
- [17] MASOUD A A. Decentralized self-organizing potential field-based control for individually motivated mobile agents in a cluttered environment: A vector-harmonic potential field approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2007, 37(3): 372-390.
- [18] JARADAT M A K, GARIBEH M H, FEILAT E A. Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field[J]. Soft Computing, 2012, 16: 153-164.
- [19] MONTIEL O, OROZCO-ROSAS U, SEPÚLVEDA R. Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42 (12): 5177-5191.
- [20] KELLEY A M. Single molecule chemistry and physics [M]. New York, USA: Springer, 2006.
- [21] HEINBOCKEL J H. Introduction to tensor calculus and continuum mechanics [M]. Canada: Trafford Publishing, 2001.

(编辑:张蓓)