

无人机在高铁巡检中自主避障方案的设计与实现

马占川

(昆明铁路局设备监造处, 云南 昆明 650215)

摘要: 高铁巡检中无人机自主巡检扮演着重要的角色。为了提高无人机的工作效率和工作范围, 首先要解决无人机在自主巡检过程中的避障问题。主要研究避障算法, 提出了一种基于迭代重组 (iterative recombination, IRIS) 和人工势场 (artificial potential field, APF) 相结合的避障方案。根据无人机自主巡检的需求和约束条件, 对 IRIS 和 APF 进行优化和有效的组合, 实现了 IRIS 算法在无人机避障中的应用, 确保了无人机朝着目标点的准确走向。通过仿真和试验验证, 提出的 IRIS-APF 避障方案不仅达到避障的目的, 而且实现了较高的算法速度和精度。

关键词: 高铁; 无人机; 迭代重组; 人工势场; 避障; Matlab

中图分类号: U298.1⁺2; V279⁺.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.022

Design and Implementation of Autonomous Obstacle Avoidance Scheme for UAV in High-speed Rail Inspection

MA Zhanchuan

(Equipment Supervising, Kunming Railway Bureau, Kunming, Yunnan 650215, China)

Abstract: UAV autonomous inspection plays an important role in high-speed rail inspection. In order to improve the efficiency and scope of UAV work, the obstacle avoidance problem of UAV in the process of autonomous inspection must be solved. The obstacle avoidance algorithm was mainly studied, and an obstacle avoidance scheme based on the combination of IRIS (iterative recombination) and APF (artificial potential field) was proposed. According to the requirements and constraints of UAV autonomous inspection, the IRIS and APF were optimized and effectively combined to achieve the application of IRIS algorithm in the UAV obstacle avoidance, which ensured the accurate direction of the UAV toward the target point. Through the simulation and experimental verification, the proposed IRIS-APF obstacle avoidance scheme not only achieves the goal of avoiding obstacles, but also achieves a higher algorithm speed and accuracy.

Keywords: high-speed rail; UAV; IRIS; APF; obstacle avoidance; Matlab

0 引言

伴随着高速铁路的快速发展, 高铁线路中的各种电气故障或安全隐患也逐渐增加。高铁巡检任务除了包括巡检路基、路轨、道岔、信号灯、输电线、封闭

网和铁路桥梁, 还包括对铁路沿线设施、通信线路的巡查。目前, 中国的高铁巡检仍然是采用人工来完成。利用无人机对高铁线路进行巡检, 可以实现线路所至无人机所达, 近距离高精度巡检, 不存在巡检盲区, 尤其适用于那些穿越大山、森林和跨越大江大河等人工不能到达线路的巡检。因此, 高铁线路无人机巡检

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-03-07

已成为高铁维护应用领域的一个研究热点。

无人机巡检是以无人机为载体，以巡检仪器（如可见光摄像机、红外成像仪、损伤探测仪和扫描云台等）作为载荷系统，采用地面遥控或者无人机自主工作的作方式，完成对高速铁路线路状况、配套设施等的巡检。虽然无人机巡检显示出巨大的优势和潜在的应用潜力，但是由于高铁线路环境复杂，障碍物种类和数量较多，所以无人机巡检迫切需要解决自主避障问题。

针对无人机巡检中的多种要求和限制条件，本文提出了基于 IRIS（迭代重组）和 APF（人工势场）相结合的避障方案，即 IRIS-APF 避障方案。通过采用 IRIS 算法计算无人机工作区的安全区域，并与 APF 算法相结合寻找最优路径。然后，在此基础上改进算法，提高算法计算速度和精度。

1 IRIS-APF 避障方案

1.1 IRIS 算法

IRIS 算法是一种通过一系列凸优化快速计算无障碍区域内最大凸多边形的算法。这个凸多边形可以作为无人机飞行的安全区域，与传统的基于障碍物位置的避障思想不同，通过这种算法可获得无人机自由飞行的区域，从而提高无人机巡航的灵活性和可靠性。

该算法主要用途在于获得一个球体和一个能够分离球体和障碍物的超平面集。球体可用一组单位球体来表示：

$$\varepsilon(C, d) = \{x = C\tilde{x} + d \mid \|\tilde{x}\| \leq 1\} \quad (1)$$

使用线性约束来表示超平面集合，即

$$P = \{x \mid Ax \leq b\} \quad (2)$$

然后，获得障碍物空间中最大的凸起区域。在 IRIS 算法中，在空间选取一个初始点，以该点为单位球的中心得到一个初步椭圆，再对障碍物信息进行迭代，为每个障碍物生成一个超平面来分离障碍物和球体，并将这些超平面定义为一组线性约束，这些平面的交点就是一个凸包。在凸包中找到一个最大的内切椭球，然后用椭球定义一个新的超平面集合，得到一个新的凸包。重复上述过程，直到球体积收敛。IRIS 算法实现流程图如图 1 所示。

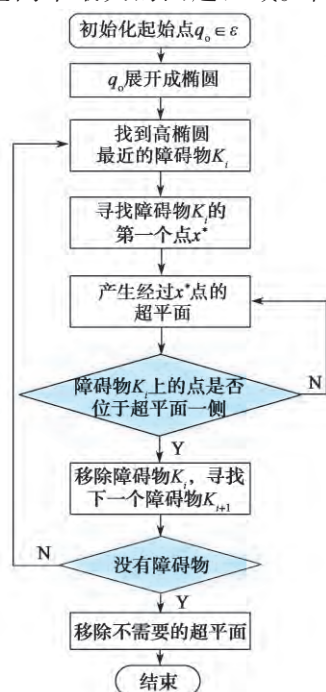


图 1 IRIS 算法流程图

1.2 APF 算法

APF 算法是路径规划的常用方法，原理是将无人机在环境中的运动视为一种在虚拟的人工受力场中的运动。无人机、障碍物和目标点的相应位置如图 2 所示。

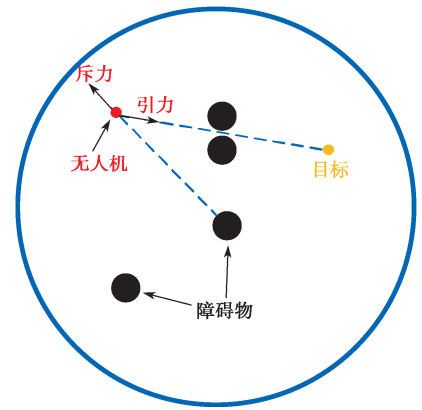


图 2 APF 工作原理图

APF 包括吸引力场和斥力场。引力场随着无人机与目标点的距离增加而单调递增，且方向指向目标点；斥力场在无人机处在障碍物位置时有一极大值，并随无人机无障碍物的距离增大而单调减小，方向指向远离障碍物的方向。目标点对无人机产生引力，引导物体向其方向移动，而障碍物则对物体产生斥力，避免与物体相撞。引力和斥力的合力作为无人机的加速力，来控制无人机的运动方向和计算无人机的位置。无人机与目标点之间的斥力场为

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} 0 & \rho(q) > \rho_0 \\ \frac{1}{2}\eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \rho(q) \leq \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： η 为一个正常数； $\rho(q)$ 为机器人与障碍物之间的最小距离； ρ_0 为障碍物的影响距离。

目标点和障碍物产生的虚拟力分别为

$$F_{\text{att}}(q) = -\nabla U_{\text{att}}(q) = -\xi(q - q_g) \quad (4)$$

$$F_{\text{rep}}(q) = -\nabla U_{\text{rep}}(q) = \eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left(\frac{1}{\rho^2(q)} \right) \frac{q - q_0}{\|q - q_0\|} \quad (5)$$

因此，机器人在运动空间中的合势场和合力分别为

$$U_{\text{total}} = U_{\text{att}}(q) + U_{\text{rep}}(q) \quad (6)$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}}(q) + F_{\text{rep}}(q) \quad (7)$$

式中： $U_{\text{att}}(q)$ 和 $U_{\text{rep}}(q)$ 分别为机器人与目标点之间的引力和斥力； $F_{\text{att}}(q)$ 和 $F_{\text{rep}}(q)$ 分别为机器人与目标点之间的引力场和斥力场。

图 3 描述了传统的 APF 的实现过程。传统的 APF 存在以下几个问题：

①当物体远离目标点时，吸引力将变大，但斥力相对较小甚至可以忽略不计，在目标路径上可能遇到障碍。

②当目标点附近有障碍物时，斥力会变得很大，

但吸引力相对较小, 所以物体难以到达目标点。

③可能存在一个点, 该点的引力和斥力大小相同, 但方向相反, 则物体可能进入局部最优解或振荡状态。

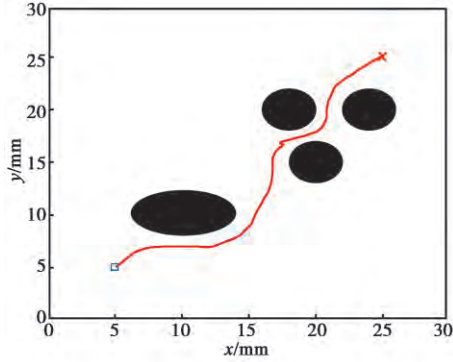


图3 传统 APT 原理

1.3 IRIS-APF 避障方案

IRIS 算法是由一些初始化的种子点所决定的。该算法一般会随机选择初始化种子点, 但在实际应用中, 由 IRIS 算法生成的凸包群应具有一定的定向性, 所以种子点的选择需要有方向性。因此, 提出了 IRIS-APF 组合方法, 用 APF 生成有方向种子点, 然后用这些种子点生成凸包, 从而生成路径。

由于 APF 可能陷入局部最小问题, 可将无人机和障碍物的相对速度和相对加速度因子引入到斥力场公式中, 即

$$U_{rep}(q, v, a) = \begin{cases} 0, & \rho(q) > \rho_o \text{ 或 } v_{ro} \leq 0 \\ \eta_1 \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_o} \right) + \eta_2 v_{ro} + \eta_3 a_{ro}, & \rho(q) \leq \rho_o \text{ 或 } v_{ro} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: η_1, η_2, η_3 为正常数; ρ_o 为障碍物的影响距离; $v_{ro} = (v - v_{obs})^T e_{ro}$ 为无人机与障碍物之间的相对速度; $a_{ro} = (a - a_{obs})^T e_{ro}$ 为无人机与障碍物之间的相对加速度。

避障功能只有在障碍物进入影响范围内才会起作用。

作用于无人机的斥力可由斥力场函数得出, 即

$$F_{rep}(q, v, a) = \begin{cases} 0 & \rho(q) > \rho_o \text{ 或 } v_{ro} \leq 0 \\ F_{repq} + F_{repv} + F_{repa} & \rho(q) \leq \rho_o \text{ 或 } v_{ro} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$F_{repq} = -\nabla_q \left[\eta_1 \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_o} \right) + \eta_2 v_{ro} + \eta_3 a_{ro} \right] \quad (10)$$

$$F_{repv} = -\nabla_v \left[\eta_1 \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_o} \right) + \eta_2 v_{ro} + \eta_3 a_{ro} \right] \quad (11)$$

$$F_{repa} = -\nabla_a \left[\eta_1 \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_o} \right) + \eta_2 v_{ro} + \eta_3 a_{ro} \right] \quad (12)$$

相应的引力场也需要考虑无人机的速度和加速度, 即

$$U_{att}(q, v, a) = \xi_q \|q - q_g\|^2 + \xi_v \|v\|^2 + \xi_a \|a\|^2 \quad (13)$$

引力为

$$F_{att}(q, v, a) = F_{attq}(q) + F_{attv}(v) + F_{atta}(a) \quad (14)$$

2 算法仿真与分析

仿真验证主要包括对 IRIS 算法在路径规划中的可靠性以及改进的 APF 对 IRIS 算法的改进效果。无人机的工作环境通过 Matlab 构建, 设定运动目标的参数为: 初始位置为 $q_g = (0.7, 0)^T$, 初始速度和加速度分别为 $v = (0, 0)^T$, $a = (0, 0)^T$; 设定无人机的参数为: 初始位置为 $q = (-0.7, 0)^T$, 初始速度和加速度分别为 $v = (0, 0)^T$, $a = (0, 0)^T$; 设定算法公式参数: $\xi_q = 0.5$, $\xi_v = \xi_a = 3$ 。

IRIS 算法使用 Matlab 软件实现, 采用 CVXGEN 工具箱求解最小距离化简问题。给定一组随机凸障碍、有界环境和一个初始点, 通过 IRIS 算法运算后得到最大凸区域, 算法实现如图 4~图 5 所示。图 4 中, 空间凸状障碍物是随机生成, 设定初始化一个点 q_o (即种子), 然后算法通过连续迭代和基于上述点的计算来获取包括该点在内的最大凸面积。图 5 是该算法在三维环境下的实现, 最后获取的是包含种子点在内的最大凸面球。

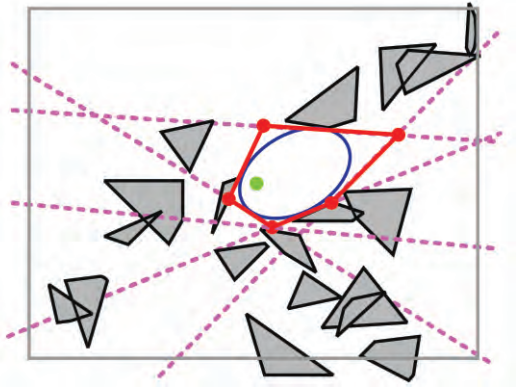


图4 算法在二维空间中的实现

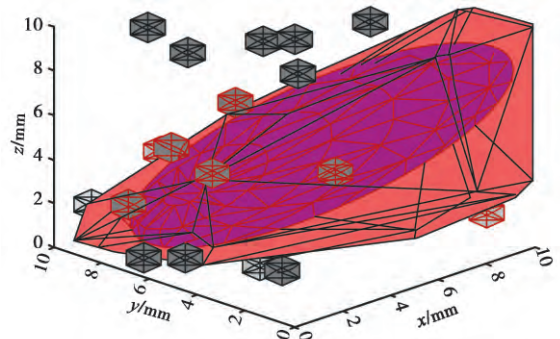


图5 算法在三维空间中的实现

图 6 是 IRIS 算法的运行时间分析图。Matlab 中设定环境变化 100 次, 每个环境随机产生 $10 \sim 10^6$ 个障碍物; 然后计算生成单个球面或者球体的时间。从图 6 中可以看出, 随着障碍物数量的增加, CPU 运算时间

增加；随着障碍物数量的增加，计算球面的算法速度在急剧增加，而计算球体的算法速度几乎不变。

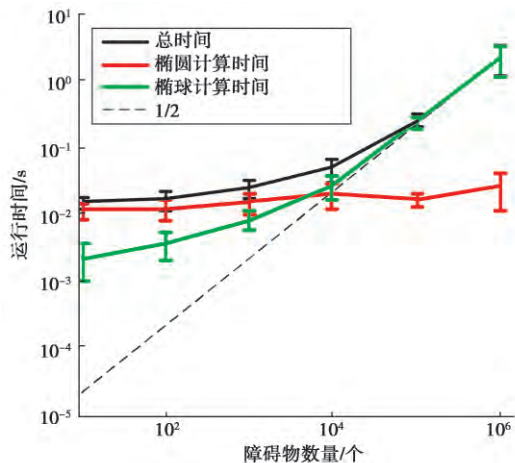


图6 算法运行时间与障碍物数量的关系图

3 试验结果与分析

现场作业实际使用情况与 IRIS 算法避障比较，如图7所示。IRIS 算法虽然能有效实现无人机在静态环境下的避障，但是最终获得的路径会遇到障碍，无人机存在潜在的飞行安全风险。图8是采用了 IRIS-APF 避障算法，有效改善此问题，既保证无人机在障碍物之外的绿色散点飞行，又保证这些绿色散点形成的路径避开了障碍物。

经过以上条件进行测试可以看出，本文提出的 IRIS-APF 算法能够有效地弥补 IRIS 算法在路径规划上的不足，且运行效果良好，能够按预定策略自主避障，

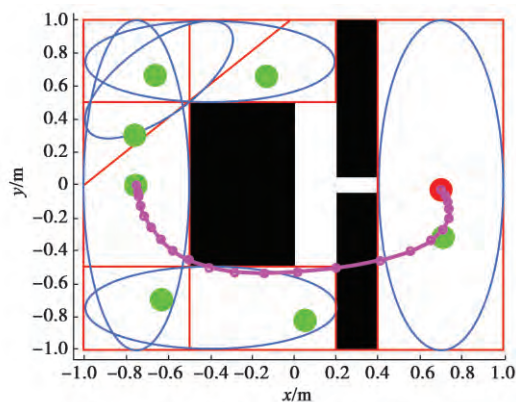


图7 IRIS 算法避障效果

不但保证了无人机安全可靠地飞行，而且还可以有意识地向目标前进，避障成功率和巡检作业效率大幅度提高。

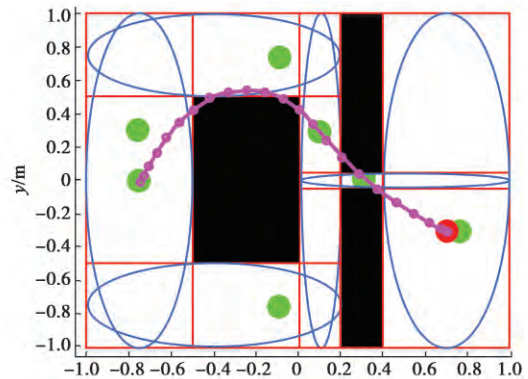


图8 IRIS-APF 算法避障效果

4 结语

本文研究了无人机在飞行过程中的避障问题，提出了一种基于 IRIS 算法和 APF 结合的无人机避障方案，实现了无人机自主避障。采用 IRIS 算法计算无人机工作区域内的安全区域，并通过 APF 在该区域内获取下一个前进位置，以确保无人机朝着目标点规划路径前进。本文不仅实现了无人机的避障计划，同时提高了算法的速度和精度以适应无人机实时性高的要求。

参考文献：

- [1] 霍风财, 任伟建, 刘东辉. 基于改进的人工势场法的路径规划方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(3): 63-67.
- [2] 陈显龙, 陈晓龙, 赵成. 无人机在路桥病害检测中的设计与实现[J]. 测绘通报, 2016(4): 79-82.
- [3] 苏奎峰, 吕强. TMS320X281XDSP 原理及 C 程序开发[M]. 北京: 中国航空航天大学出版社, 2008.
- [4] 彭程. 共轴八旋翼无人飞行器姿态与航迹跟踪控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [5] 郭芳. 复杂环境下四旋翼无人机定位研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [6] Michael N, Mellinger D, Lindsey Q, et al. The grasp multiple micro-uav testbed[J]. IEEE, Robotics & Automation Magazine, 2010, 17(3): 51-65.

作者简介：马占川（1969—），男，工程师，研究方向为工务机械车。

（上接第47页）

- [3] 唐威, 忻力, 魏海山, 等. SiC 混合 IGBT 器件应用研究[J]. 大功率变流技术, 2015(2): 40-43.
- [4] 殷丽, 王传敏. 超低导通电阻 RON 的 SiC 沟槽器件[J]. 电力电子, 2012(5): 49-52.
- [5] WANG Li, HU Xiaobu, XU Xiangang, et al. Synthesis of High

Purity SiC Powder for High-resistivity SiC Single Crystals Growth[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007(1): 118-122.

作者简介：杨涛（1985—），男，工程师，从事大功率 IGBT 的应用研究及配套门极驱动器开发工作。