

基于碰撞锥改进人工势场的无人机避障路径规划

熊 超^a, 解武杰^b, 董文瀚^c

(空军工程大学 a. 研究生院; b. 装备管理与无人机工程学院; c. 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对人工势场法在进行无人机航迹规划时易陷入局部最优、在狭窄通道中存在抖动现象等问题, 提出一种基于碰撞锥改进势场法的无人机避障路径规划算法。利用碰撞锥碰撞检测条件设计障碍物斥力势场判定系数, 以排除由无关障碍物势场产生的不利影响。根据障碍物类型威胁度和无人机与障碍物间相对状态威胁度, 设计模糊斥力增益调节系数来解决人工势场易陷入局部最优的问题。同时, 为防止势场变化和通过狭窄通道时引发的抖动现象, 设计抖动抑制调节系数并给出抖动情况下的航迹点规划方法。在此基础上, 基于碰撞锥改进人工势场函数设计一种无人机避障路径规划算法。实验结果表明, 相对人工势场避障算法, 该算法能够解决算法易陷入局部最优和存在的抖动问题, 且在规避动态障碍物时取得了较好效果。

关键词: 人工势场; 碰撞锥; 复杂动态环境; 无人机; 避障

中文引用格式: 熊 超, 解武杰, 董文瀚. 基于碰撞锥改进人工势场的无人机避障路径规划[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 314-320.

英文引用格式: XIONG Chao, XIE Wujie, DONG Wenhan. Obstacle avoidance path planning for UAV based on artificial potential field improved by collision cone[J]. Computer Engineering, 2018, 44(9): 314-320.

Obstacle Avoidance Path Planning for UAV Based on Artificial Potential Field Improved by Collision Cone

XIONG Chao^a, XIE Wujie^b, DONG Wenhan^c

(a. Graduate School; b. Equipment Management and UAV Engineering College; c. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

[Abstract] In order to solve the problem that the artificial potential field method for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) flight path planning is easy to fall into the local optimal and jitter in the narrow channel, a path planning algorithm based on potential field method improved by collision cone is proposed. Firstly, the determination coefficient of the repulsive potential field of the obstacle is designed by using the collision detection conditions of the collision cone, and the possible adverse effects of the unrelated obstacle potential field are excluded. Then, according to the threat degree of obstacle type and the relative state threat degree of UAV and obstacle, the fuzzy repulsion gain adjustment coefficient is designed to solve the problem that the artificial potential field tends to fall into the local optimal. In addition, in order to prevent the jitter problems caused by changing of potential field and passing through the narrow channel between the obstacles, the jitter adjustment coefficient is also designed and the track point planning method under jitter condition is given. Finally, the obstacle avoidance path planning algorithm for UAV is designed based on the improved artificial potential field function of collision cone. Experimental results show that, compared with the artificial potential field obstacle avoidance algorithm, the proposed algorithm can solve the problem of local optimal and jitter, and it has achieved good results in avoiding dynamic obstacles.

[Key words] artificial potential field; collision cone; complex dynamic environment; Unmanned Aerial Vehicle(UAV); obstacle avoidance

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0050149

0 概述

无人机在军事、民用领域拥有巨大的发展潜力,

航迹规划是提高无人机自主化能力并确保飞行安全的关键技术之一^[1]。当前, 对于静态已知环境下航迹规划问题的研究已经取得了较多成果, 而复杂动

基金项目: 航空科学基金(20141396012)。

作者简介: 熊 超(1994—), 男, 硕士研究生, 主研方向为飞行控制与仿真; 解武杰, 副教授; 董文瀚, 教授、博士生导师。

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-02-26 E-mail: 2512150343@qq.com

态环境下无人机实时路径规划正成为航迹规划领域研究的热点问题^[2-3]。

常用的航迹规划方法主要有人工势场法^[4]、A*算法^[5]、RRT算法^[6]、粒子群算法^[7]、蚁群算法^[8]等。人工势场法因计算简单、实时性好、意义明确、便于实现等特点引起了研究者的广泛关注,但传统人工势场法存在易陷入局部最优^[9]、在狭窄通道中存在航迹抖动^[10]、对于动态障碍物规避效果不佳^[11]等问题。针对上述缺陷,国内外学者进行了大量研究,但多数研究者仅考虑人工势场法的某种特定缺陷,没有给出一种较好的综合性解决方案。且人工势场法在感知障碍物后会立即做出反应,而对于障碍物的状态、运动趋势和其对航迹规划的影响程度不做判断,这也是人工势场法无法较好地应用于复杂动态环境下无人机实时航迹规划的重要原因之一。

目前,解决无人机动态威胁规避问题比较公认的思路是类似于有人机的“发现-规避”的“感知-规避”方式,其中,碰撞锥方法就是较典型的“感知-规避”方法。碰撞锥概念由文献[12-13]提出,该方法在无人机动态障碍物规避,尤其是在实时碰撞检测和威胁评估方面有着巨大优势。碰撞锥仅基于无人机和障碍物相对位置矢量和相对速度矢量的简单几何关系,即可实现对2个未知轨迹的移动目标进行碰撞检测,并能实时预测无人机与障碍物的碰撞位置及碰撞时间。碰撞锥因其快速准确的碰撞预测和评估能力,近年来被广泛应用于动态环境下无人机^[14]、高速无人艇^[15-16]的实时碰撞检测与威胁评估中。

本文利用碰撞锥的碰撞检测条件与威胁评估手段来改进人工势场函数,提出一种基于碰撞锥改进人工势场的无人机避障路径规划算法。首先基于碰撞锥对探测到的障碍物进行碰撞检测,且仅对存在潜在碰撞威胁的障碍物实现斥力势场建模;然后综合障碍物类型威胁度和基于碰撞锥获取的相对状态威胁度,设计模糊斥力增益调节系数,同时采用动态步长、降低障碍物势场强度、增大目标势场强度的方法防止抖动,给出抖动检测条件及抖动情况下无人机航迹点获取方法,并通过不同的系数值自适应地调节人工势场强度,在此基础上,设计一种无人机避障路径规划算法;最后,通过数值仿真技术将本文算法与文献[4]算法进行仿真对比分析,以验证本文算法的路径规划性能。

1 问题描述

航迹规划是指在规划空间内寻找一条从起飞点到指定目标点的最优飞行航线,它是无人机执行任务的基础和前提,其本质上是一个带约束的优化问题^[2]。在飞行过程中,无人机除躲避已知的静态障

碍物外,还必须规避飞行过程中的探测(如高炮、雷达、防空导弹)覆盖区域及未知的动态障碍物威胁,以确保其自身的飞行安全。人工势场法主要根据环境中目标点引力势场和障碍物斥力势场形成的总势场来进行航迹规划。

常用的目标点引力势场模型为^[4]:

$$U_{\text{att}} = \frac{1}{2} \xi \rho^2(p, p_{\text{goal}}) \quad (1)$$

其中, ξ 为正引力因子, p, p_{goal} 为无人机和目标点位置, $\rho(p, p_{\text{goal}}) = \|p_{\text{goal}} - p\|$ 为无人机到目标点的距离。

根据式(1)可知目标点引力 F_{att} 为:

$$F_{\text{att}} = -\nabla U_{\text{att}}(p) = \xi(p_{\text{goal}} - p) \quad (2)$$

障碍物斥力势场模型为^[4]:

$$U_{\text{obs}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \times \\ \rho^n(p, p_{\text{obs}}), \rho(p, p_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(p, p_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, η 为正斥力因子, $\rho(p, p_{\text{obs}})$ 为无人机与障碍物的距离, ρ_0 为障碍物势场影响范围, n 为待优化参数。

根据式(3)可知障碍物斥力 F_{obs} 为:

$$F_{\text{obs}}(p) = -\nabla U_{\text{obs}}(p) = \begin{cases} F_{\text{obs1}} \mathbf{e}_{\text{OR}} + F_{\text{obs2}} \mathbf{e}_{\text{RG}}, \rho(p, p_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(p, p_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$F_{\text{obs1}} = \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho^n(p, p_{\text{goal}})}{\rho^2(p, p_{\text{obs}})} \quad (5)$$

$$F_{\text{obs2}} = \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^{n-1}(p, p_{\text{goal}}) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{e}_{\text{OR}} = \nabla \rho(p, p_{\text{obs}})$ 、 $\mathbf{e}_{\text{RG}} = -\nabla \rho(p, p_{\text{goal}})$ 分别为障碍物指向无人机和无人机指向目标点的单位向量, $F_{\text{obs1}} \mathbf{e}_{\text{OR}}$ 使无人机远离障碍物, $F_{\text{obs2}} \mathbf{e}_{\text{RG}}$ 使无人机向目标点移动。

采用人工势场法从无人机当前位置 p 规划一条航迹至目标点位置 p_{goal} 的过程可简单描述为:通过式(1)、式(2)在目标点位置建立引力势场模型,通过式(3)~式(6)在障碍物位置建立斥力势场模型;根据建立的环境势场模型计算起点 p 处的合力,将沿合力方向、与起点距离为规划步长的位置作为规划的下一个航迹点,并以此航迹点为新的起点再次进行相同的计算,直到航迹点到达目标区域后结束规划任务,依次连接在此过程中获得的航迹点,即为人工势场法所规划出的航迹。

由上述过程可以看出,所规划的航迹方向取决于总力场的方向,即目标点和障碍物所产生的势场决定了航迹的走向。因此,如何恰当地调节目标点和障碍物的势场强度,使总势场的方向总指向一个较好的位置,是获得更优规划航迹的关键所在。

2 基于碰撞锥改进的人工势场函数

2.1 障碍物斥力势场判定系数设计

采用上文所提的势场函数进行航迹规划时,只要无人机进入障碍物的势场作用范围就会受到其斥力势场影响。这些影响有时并无必要,有时甚至可能导致算法陷入局部最优,如图 1 所示。

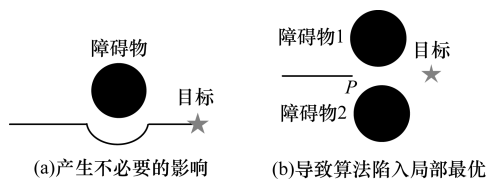


图 1 人工势场法缺陷示意图

在图 1(a)中无人机与障碍物并无碰撞危险,但由于无人机进入障碍物势场作用范围后受到其斥力影响,使无人机改变了当前航迹;在图 1(b)中无人机与障碍物 1 和障碍物 2 均无碰撞危险,在采用人工势场方法时,由于 2 个障碍物斥力势场的共同作用,导致在某点 P 处出现合力为 0 的情况,从而使算法陷入局部最优。为解决这一问题,本文设计一种障碍物势场判定系数。首先基于碰撞锥对障碍物是否存在碰撞威胁进行判断,然后将不存在碰撞威胁的障碍物斥力势场强度降为 0。

三维碰撞锥可由水平平面和垂直平面上的碰撞锥组合得到。由于两者设计原理相同,因此本文仅对水平平面上的碰撞锥进行分析,其几何结构如图 2 所示^[14]。

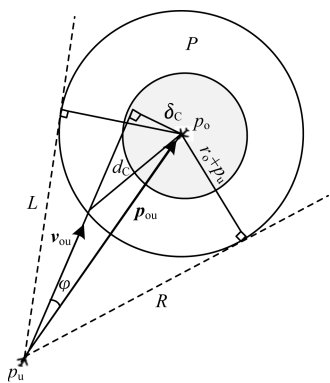


图 2 水平平面上的碰撞锥结构

在图 2 中, p_u 、 p_o 分别为无人机和障碍物的位置, $p_{ou} = p_o - p_u$ 为无人机和障碍物的相对位置矢量, r_u 、 r_o 分别为无人机与障碍物的半径, $d_c = r_u + r_o$ 为障碍物碰撞半径,碰撞区域 P 是以 p_o 为圆心、 d_c 为半径的球体, v_{ou} 表示无人机相对障碍物的速度矢量, L 、 R 分别为过无人机做碰撞区域 P 的左切线和右切线,相对位置矢量 p_{ou} 与左切线 L 的夹角为 β^+ ($\beta^+ > 0$),与右切线 R 的夹角为 β^- ($\beta^- < 0$), $\beta^- = -\beta^+$, φ

为相对速度矢量 v_{ou} 和相对位置矢量 p_{ou} 的夹角, v_{ou} 在 p_{ou} 左侧时 φ 为正,在右侧时 φ 为负, δ_c 为无人机与障碍物最接近点间的距离。

根据碰撞锥几何关系,若以无人机所在位置 p_u 为顶点沿相对速度矢量 v_{ou} 方向的射线穿过碰撞区域 P ,则无人机与障碍物存在潜在碰撞危险。采用式(7)作为潜在碰撞检测条件:

$$p_{ou} \cdot v_{ou} \geq 0, \delta_c < d_c \tag{7}$$

式(7)指仅当相对位置矢量 p_{ou} 与相对速度矢量 v_{ou} 夹角范围在 $\pm \pi/2$,且无人机与最接近点距离小于碰撞半径时,才视障碍物与无人机存在潜在碰撞。利用该碰撞检测条件,不仅可以避免由无关性障碍物带来的不利影响,而且可以降低总势场建模复杂度,加快规划速度。

设定如下的障碍物斥力势场判定系数:

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1, & p_{ou} \cdot v_{ou} \geq 0, \delta_c < d_c \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{8}$$

其中, λ_1 为障碍物势场判定系数,当 $\lambda_1 = 1$ 时该障碍物产生斥力势场,否则,将该障碍物势场强度调整为 0。

2.2 模糊斥力增益调节系数设计

传统人工势场法的引力势场强度和斥力势场强度在某点处始终不变,因而存在一个固定的引力和斥力相等的位置,当无人机运动到该位置时将陷入局部极小值,从而导致规划失败。本文将障碍物的类型威胁度 T_d 和相对状态威胁度 T_{ss} 通过模糊规则进行模糊化,建立模糊控制器来调节斥力增益,使局部极小值位置处于一个运动的状态,此时无人机将处于一个动态的模糊势场中,这将有效解决人工势场法容易陷入局部极小值导致目标不可达的问题。

根据障碍的类型可将障碍划分为 5 个威胁等级,不同的等级对应不同的障碍类型威胁度,当环境中的某点同时受多种威胁影响时,威胁度值取最高值^[3]。威胁等级和威胁度 (T_d) 的对应关系如表 1 所示。

表 1 障碍威胁等级与威胁度

障碍类型	威胁等级	威胁度
小口径高炮群	1	16
大口径高炮群	2	25
便携式防空导弹群	3	36
地空导弹群,探测雷达	4	49
不可穿越	5	100

当检测到的障碍物满足潜在碰撞条件时,障碍物将产生斥力势场。为应对复杂动态环境,需要对无人机与障碍物的相对运动状态进行分析,并根据相对状态威胁度及时调节障碍物势场强度。本文基

于碰撞锥几何关系,提出用避障剩余时间来描述无人机与障碍物的相对状态威胁度的方法。避障剩余时间综合考虑无人机与障碍物的相对位置矢量、相对速度矢量、障碍物大小等诸多因素,能较全面地反映障碍物与无人机相对状态的威胁程度。根据图 3 所示的几何关系,避障剩余时间 T_{ns} 可由式(9)计算。

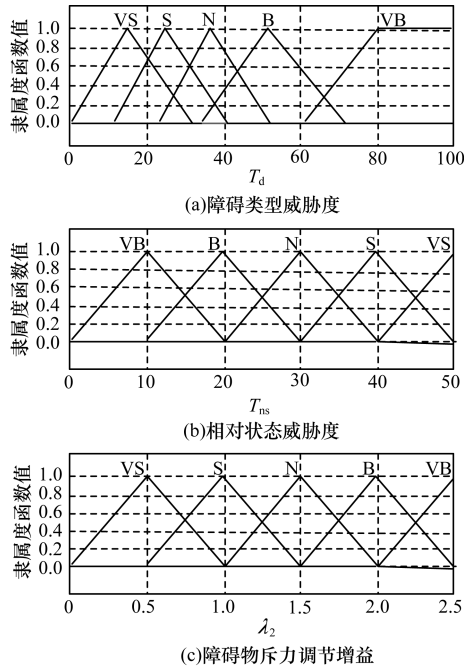


图 3 输入输出隶属度函数

$$T_{ns} = T_s - T_n \tag{9}$$

$$T_s = \frac{\|p_{ou}\| \cos \varphi - \sqrt{d_c^2 - \|p_{ou}\|^2 \sin^2 \varphi}}{\|v_{ou}\|} \tag{10}$$

$$T_n = \frac{\min\{|\beta^+ - \varphi|, |\beta^- - \varphi|\}}{q_{max}} \tag{11}$$

其中, T_s 表示无人机与障碍物保持原相对运动状态时当前时刻到发生碰撞间的时间, 本文将将其称为避障可用时间, T_n 表示无人机根据碰撞锥方法提供的避障方向以自己的极限性能进行规避所消耗的时间, 本文将将其称为避障需用时间, q_{max} 表示无人机的最大转弯角速度。

在图 3 中, 控制器输入为障碍类型威胁度 $T_d \in [0, 100]$ 和相对状态威胁度 $T_{ns} \in [0, 50]$, 输出为障碍物斥力调节增益 $\lambda_2 \in [0.5, 2.5]$ 。模糊论域被划分为 5 个等级: VB, B, N, S, VS, 分别代表“非常大”“大”“一般”“小”“非常小”。障碍类型威胁度 T_d 、相对状态威胁度 T_{ns} 、障碍物斥力调节增益 λ_2 的隶属度函数分别如图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 所示。

根据威胁度越大时斥力因子增益越大, 即 T_d 越大 T_{ns} 越小时 λ_2 越大的原则, 设计模糊规则, 如表 2 所示。

表 2 模糊规则

T_{ns}	T_d				
	VS	S	N	B	VB
VB	VS	VS	VS	S	S
B	VS	VS	S	S	N
N	VS	S	S	N	B
S	S	S	N	B	VB
VS	S	N	B	VB	VB

2.3 抖动抑制调节系数设计

如果采用本文所提的判据对障碍物斥力势场强度进行调节, 则会出现势场强度突变的情况, 这可能会使规划航迹出现抖动现象。如图 4 所示, 无人机到达航迹点 A 后根据碰撞检测条件发现障碍物已无碰撞危险, 此时障碍物的斥力势场突然消失。由于目标点的引力作用, 无人机会突然改变航向朝目标点移动, 此时障碍物将重新满足碰撞检测条件, 斥力势场又突然产生。为避免与障碍物发生碰撞, 无人机的航迹方向会再次突变, 以远离障碍物, 此时障碍物斥力势场又将突然消失。如此反复, 这将造成规划路径产生抖动, 严重时还可能导致碰撞。

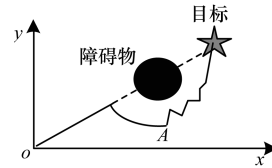


图 4 抖动现象描述

为解决势场突变和通过障碍间狭窄过道时发生抖动的问题, 本文设计一个抖动抑制调节系数, 当抖动现象发生时, 用该系数动态调整规划步长与引力势场和斥力势场的强度。

采用动态的规划步长不仅可使无人机航迹沿着合适的方向, 而且能够抑制相邻两步合力方向发生显著变化导致的人工势场法抖动现象。当第 j 步发生抖动时, 第 $j+1$ 步的位置可由下式计算:

$$\begin{bmatrix} x_{j+1} \\ y_{j+1} \\ z_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j + \lambda_2 \times l \times \cos\left(\theta_{x,j-1} + \frac{1}{2}\Delta\theta_{x,j}\right) \\ y_j + \lambda_2 \times l \times \cos\left(\theta_{y,j-1} + \frac{1}{2}\Delta\theta_{y,j}\right) \\ z_j + \lambda_2 \times l \times \cos\left(\theta_{z,j-1} + \frac{1}{2}\Delta\theta_{z,j}\right) \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中, $\theta_{x,j-1}$ 、 $\theta_{y,j-1}$ 、 $\theta_{z,j-1}$ 分别为第 $j-1$ 步合力与 x 轴、 y 轴和 z 轴的夹角, $\Delta\theta_{x,j}$ 、 $\Delta\theta_{y,j}$ 、 $\Delta\theta_{z,j}$ 分别为第 $j-1$ 步到第 j 步合力与 x 轴、 y 轴和 z 轴的夹角的变化值, l 为步长。 λ_3 为防抖动调节系数, 其可由下式求得:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \varepsilon, \theta_0 < \Delta\theta_j < \pi \\ 1, \text{else} \end{cases}$$

$$\Delta\theta_j = \sqrt{|\Delta\theta_{x,j}|^2 + |\Delta\theta_{y,j}|^2 + |\Delta\theta_{z,j}|^2} \quad (13)$$

其中, ε 为大于 0 小于 1 的调节系数, $\Delta\theta_j$ 为第 $j-1$ 步与第 j 步合力方向变化值, θ_0 是根据航迹规划指标设定的阈值, 当 $\theta_0 < \Delta\theta_j < \pi$ 时表明此时航迹发生了抖动, 下一步位置将通过式(12)计算。

另外, 为减小抖动幅度同时使无人机尽快脱离抖动区域, 采取适当的减小障碍物斥力、增大目标点引力的措施, 在发生抖动情况时, 将障碍物斥力因子调整为 $\lambda_3\eta$ 、目标点引力因子调整为 ξ/λ_3 。

综合上述设计, 碰撞锥改进后的总势场 U 可表示为:

$$U = U_{\text{att}} + U_{\text{obs}} \quad (14)$$

$$U_{\text{att}} = \frac{1}{2\lambda_2} \xi \rho^2(p, p_{\text{goal}}) \quad (15)$$

$$U_{\text{obs}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \times \\ \rho^n(p, p_{\text{obs}}), \rho(p, p_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(p, p_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (16)$$

合力 F 可表示为:

$$F = -\nabla U(p) = F_{\text{att}}(p) + F_{\text{obs}}(p) \quad (17)$$

$$F_{\text{att}}(p) = -\nabla U_{\text{att}}(p) = \frac{\xi}{\lambda_2} (p_{\text{goal}} - p) \quad (18)$$

$$F_{\text{obs}}(p) = -\nabla U_{\text{obs}}(p) = \begin{cases} F_{\text{obs1}} \mathbf{e}_{\text{OR}} + F_{\text{obs2}} \mathbf{e}_{\text{RG}}, \rho(p, p_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(p, p_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (19)$$

$$F_{\text{obs1}} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho^n(p, p_{\text{goal}})}{\rho^2(p, p_{\text{obs}})} \quad (20)$$

$$F_{\text{obs2}} = \frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \eta \left(\frac{1}{\rho(p, p_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^{n-1}(p, p_{\text{goal}}) \quad (21)$$

3 算法设计

为提高规划效率, 采用切点优化算法^[17]判断障碍物斥力势场源点位置。将障碍物膨胀成球体, 球体半径为自身外接球半径与无人机安全半径之和, 此时可将无人机视为质点, 以无人机与障碍物外接球上距离最近的点作为障碍物斥力势场源点, 该源点坐标可由下式计算^[17]:

$$p_{\text{obs},j}(x_{\text{obs},j}, y_{\text{obs},j}, z_{\text{obs},j}) = (x_{\text{obs}} + d_C a_{\text{obs}}, y_{\text{obs}} + d_C b_{\text{obs}}, z_{\text{obs}} + d_C c_{\text{obs}}) \quad (22)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} a_{\text{obs}} \\ b_{\text{obs}} \\ c_{\text{obs}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x - x_{\text{obs}}}{\sqrt{(x - x_{\text{obs}})^2 + (y - y_{\text{obs}})^2 + (z - z_{\text{obs}})^2}} \\ \frac{y - y_{\text{obs}}}{\sqrt{(x - x_{\text{obs}})^2 + (y - y_{\text{obs}})^2 + (z - z_{\text{obs}})^2}} \\ \frac{z - z_{\text{obs}}}{\sqrt{(x - x_{\text{obs}})^2 + (y - y_{\text{obs}})^2 + (z - z_{\text{obs}})^2}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中, (x, y, z) 、 $(x_{\text{obs}}, y_{\text{obs}}, z_{\text{obs}})$ 分别为无人机和障碍物的几何中心位置坐标。

在第 j 步, 目标点引力和第 i 个障碍物斥力在 x 轴、 y 轴、 z 轴的分量分别为:

$$\begin{bmatrix} F_{\text{attx},j}(p, p_{\text{goal}}) \\ F_{\text{atty},j}(p, p_{\text{goal}}) \\ F_{\text{attz},j}(p, p_{\text{goal}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{att}} \times \cos \alpha_{x,j} \\ F_{\text{att}} \times \cos \alpha_{y,j} \\ F_{\text{att}} \times \cos \alpha_{z,j} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} F_{\text{obsix},j}(p, p_{\text{obsi}}) \\ F_{\text{obsiy},j}(p, p_{\text{obsi}}) \\ F_{\text{obsiz},j}(p, p_{\text{obsi}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{obsi}} \times \cos \beta_{ix,j} \\ F_{\text{obsi}} \times \cos \beta_{iy,j} \\ F_{\text{obsi}} \times \cos \beta_{iz,j} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中, $\alpha_{x,j}$ 、 $\alpha_{y,j}$ 、 $\alpha_{z,j}$ 为第 j 步无人机与目标相对位置矢量与惯性坐标轴 x 、 y 、 z 间的夹角, $\beta_{ix,j}$ 、 $\beta_{iy,j}$ 、 $\beta_{iz,j}$ 为第 j 步无人机与第 i 个障碍物势场源点相对位置矢量与惯性坐标轴 x 、 y 、 z 间的夹角。

第 j 步无人机在 x 轴、 y 轴、 z 轴上受到的力 $F_{x,j}$ 、 $F_{y,j}$ 、 $F_{z,j}$ 分别为:

$$\begin{bmatrix} F_{x,j} \\ F_{y,j} \\ F_{z,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{attx},j}(p, p_{\text{goal}}) + \sum_i F_{\text{obsix},j}(p, p_{\text{obsi}}) \\ F_{\text{atty},j}(p, p_{\text{goal}}) + \sum_i F_{\text{obsiy},j}(p, p_{\text{obsi}}) \\ F_{\text{attz},j}(p, p_{\text{goal}}) + \sum_i F_{\text{obsiz},j}(p, p_{\text{obsi}}) \end{bmatrix} \quad (26)$$

将三轴上的分力进行合成, 可得到合力为:

$$F_j = F_{x,j} + F_{y,j} + F_{z,j} \quad (27)$$

根据无人机在第 j 步的受力情况可得无人机在第 $j+1$ 步的期望位置坐标和期望航向坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{j+1} \\ y_{j+1} \\ z_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j + \lambda_2 \times l \times \frac{F_{x,j}}{F_j} \\ y_j + \lambda_2 \times l \times \frac{F_{y,j}}{F_j} \\ z_j + \lambda_2 \times l \times \frac{F_{z,j}}{F_j} \end{bmatrix} \quad (28)$$

4 仿真结果与分析

基于碰撞锥改进人工势场避障算法的步骤为:

步骤 1 人工势场参数初始化。确定 ξ 、 η 、 ρ_0 、 l 、 ε 、 θ_0 、 n 的值,通过式(7)、式(8)确定 λ_1 的值,通过模糊规则确定 λ_2 的值,通过式(13)确定 λ_3 的值。

步骤 2 势场模型建立。首先通过式(22)、式(23)计算每个障碍物的斥力势场源点坐标,然后根据无人机当前位置、目标位置、每个障碍物的斥力势场源点位置,通过式(14)~式(21)得到环境势场模型。

步骤 3 通过式(24)~式(27)计算无人机当前位置所受的合力。

步骤 4 计算下一步无人机所处位置。通过式(13)进行抖动情况判断,若满足抖动条件则通过式(12)获取下一步位置;否则,通过式(28)获取下一步位置。

步骤 5 判断是否到达目标点,到达则终止规划;否则,判断是否到达迭代次数,到达则调整势场参数后重新进行规划,否则返回步骤 1。

将本文算法与文献[4]中的人工势场避障算法进行仿真对比,为充分展示本文算法的性能,在二维水平平面构建表 3 所示的复杂动态环境模型。其中,动态障碍物 1 沿 y 轴负方向做直线运动,动态障碍物 9 沿 x 轴负方向做直线运动。

表 3 障碍物参数

障碍物编号	坐标	碰撞半径/m	威胁等级
1	(45, -)	15	4
2	(150, 150)	25	2
3	(240, 140)	20	5
4	(280, 130)	30	5
5	(230, 300)	30	5
6	(380, 240)	30	3
7	(390, 360)	15	5
8	(350, 390)	15	4
9	(-, 200)	15	5

设计的目标点坐标为(410, 420),所采用的人工势场参数为 $\xi = 15$ 、 $\eta = 2$ 、 $\rho_0 = 30$ 、 $l = 5$ 、 $\varepsilon = 0.5$ 、 $\theta_0 = \pi/3$ 、 $n = 2$ 。仿真结果如图 5 所示,其中,圆圈内数字代表障碍物编号,障碍物的外圆环表示其势场作用范围。图 5(a)为本文算法路径规划仿真结果,图 5(b)为文献[4]算法路径规划仿真结果。由图 5 可以看出,文献[4]算法在规避障碍物 7 和障碍 8 时陷入了局部最小值,而本文算法顺利到达了目标位置,且本文算法较文献[4]算法得到的航迹更平滑。

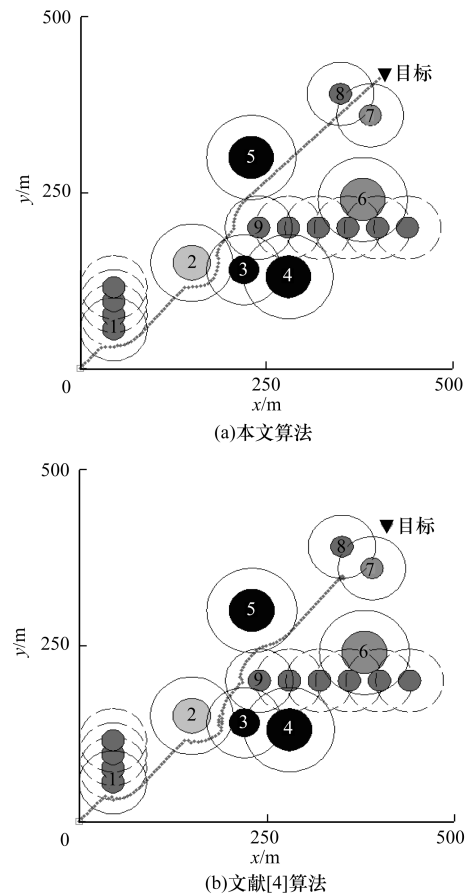


图 5 2 种算法航迹规划仿真结果

为了更充分地说明 2 种算法的效果差异,将 2 种算法的局部放大结果进行对比分析,如图 6 所示。其中,图 6(a)~图 6(d)为本文算法局部放大结果,图 6(e)~图 6(h)为文献[4]算法局部放大结果。由图 6(a)、图 6(e)、图 6(b)、图 6(f)可以看出,文献[4]算法在规避动态障碍物 1、9 时反应较迟缓,其产生的规划轨迹存在抖动问题,而本文算法的模糊斥力增益系数能根据环境中的障碍物状态及时调整斥力势场强度,因而能有效规避动态障碍物,且能产生较平滑的规划轨迹;由图 6(b)、图 6(f)可以看出,文献[4]算法在通过障碍物 2 和障碍物 3 的狭窄通道时,航迹产生了严重的抖动现象,而本文算法通过抖动抑制调节系数动态调整规划步长、障碍物斥力势场强度、目标引力势场强度,并采用抖动情况下的航迹规划方案,从而较好地解决了抖动问题,且由于障碍物 3 威胁等级较障碍物 2 高,因此本文算法规划的航迹远离了障碍物 3,略微靠近障碍物 2;由图 6(c)、图 6(g)、图 6(d)、图 6(h)可以看出,由于本文算法首先进行了障碍物碰撞检测分析,因而不受无关性障碍物 5、7、8 的势场影响,能够安全地到达目标位置,而文献[4]算法仍然采用传统势场作用

方式,在通过障碍物5时航迹发生了不必要结果改变,更严重的是,通过障碍物7和障碍物8时,在坐

标(374.1,367.6)处算法陷入局部最小值,最终没有到达预定目标位置。

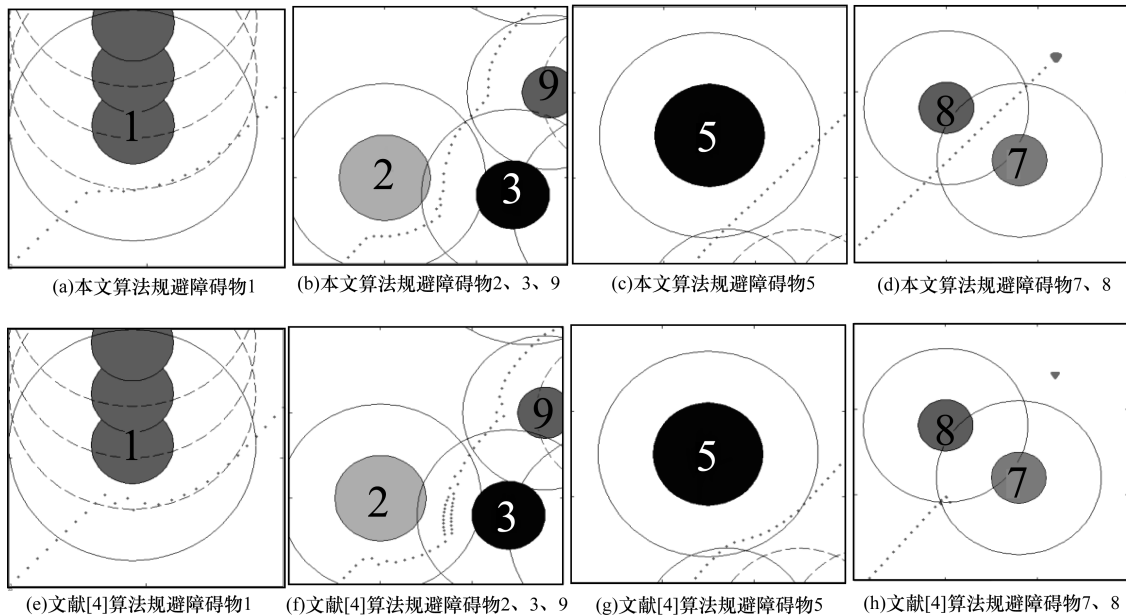


图6 2种算法局部仿真结果对比

5 结束语

本文针对人工势场在进行无人机航迹规划时易陷入局部最优、在狭窄通道中存在抖动现象、规避动态障碍效果不佳等问题,分别设计障碍物斥力势场判定系数、模糊斥力增益调节系数、抖动抑制调节系数,并将3个优化系数引入人工势场函数中,结合切点优化算法,设计一种适用于复杂动态环境的基于碰撞锥改进势场法的无人机避障路径规划算法。仿真结果表明,该算法能够克服无关障碍物势场的不利影响,在规避动态障碍物时取得较好效果,且较好地解决了算法易陷入局部最优和算法存在的抖动问题。本文探索一种新的人工势场作用模式,如何将更多、更高效的环境障碍描述指标融入人工势场函数中,使其具备更好的环境适应能力,将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] LIN Y, SARIPALLI S. Sampling-based path planning for UAV collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(11): 3179-3192.
- [2] 柏 砾,赵刚要.基于MapReduce与蚁群优化的航路规划算法[J].计算机工程,2015,41(5):38-44.
- [3] 姚 远,周兴社,张凯龙,等.基于稀疏A*搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划[J].控制理论与应用,2010,27(7):953-959.
- [4] 钟碧良,张 祺,杨宜民.基于改进势场法的足球机器人避障路径规划[J].控制理论与应用,2003,20(4): 623-626.

- [5] 张 帅,李学仁,张 鹏,等.基于改进A*算法的无人机航迹规划[J].飞行力学,2016,34(3):39-43.
- [6] 尹高扬,周绍磊,吴青坡.基于改进RRT算法的无人机航迹规划[J].电子学报,2017,45(7):1764-1769.
- [7] 方 群,徐 青.基于改进粒子群算法的无人机三维航迹规划[J].西北工业大学学报,2017,35(1):66-73.
- [8] 邢海洋,张 军,王 楠.自动导引车云导引平台的研究与设计[J].计算机工程,2017,43(7):64-69.
- [9] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [10] 吴建民,王民钢.基于视觉的轮式移动机器人导航问题研究[J].计算机工程,2014,40(8):143-146.
- [11] SUN J, TANG J, LAO S. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18382-18390.
- [12] CHAKRAVARTHY A, GHOSE D. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1998, 28(5): 562-574.
- [13] CHAKRAVARTHY A, GHOSE D. Collision cones for quadric surfaces[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(6): 1159-1166.
- [14] SEO J, KIM Y, KIM S, et al. Collision avoidance strategies for unmanned aerial vehicles in formation flight[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2718-2734.
- [15] 蒲华燕,丁 峰,李小毛,等.基于椭圆碰撞锥的无人艇动态避障方法[J].仪器仪表学报,2017,38(7): 1756-1762.
- [16] 张洋洋,瞿 栋,柯 俊,等.基于速度障碍法和动态窗口法的无人水面艇动态避障[J].上海大学学报(自然科学版),2017,23(1):1-16.
- [17] 彭 艳,国文青,刘 梅,等.基于切点优化人工势场法的三维避障规划[J].系统仿真学报,2014,26(8): 1758-1762.

编辑 吴云芳