基于改进 APF 的无人机编队航迹规划

洁,王新民,谢 蓉 杨

(西北工业大学自动化学院,陕西西安 710072)

摘 要: 传统 APF 应用于航迹规划存在不可达性、局部极小点、震荡等问题,文章提出了改进的 APF 模型 ,它的核心内容有:使用改进斥力势场函数,考虑无人机与目标的相对距离,确保目标点为整个势 场的全局最小点 解决了威胁与目标点过近导致的目标不可达问题;使用随机波动法 解决了无人机 陷入局部最小点而导致的规划失败问题;考虑传统势场法的震荡问题,提出障碍物联通法。同时,使 用 APF 进行编队控制 保持紧密编队下的无人机编队距离。仿真结果表明 利用这种方法很好地实现 了无人机编队的航迹规划。

关 键 词:算法,避碰,计算机仿真,流程图,数学模型,目标,无人驾驶空中载具,APF,无人载具 编队航迹规划 随机波动法 障碍物联通法

中图分类号: V249.1 文献标识码: A 文章编号:1000-2758(2013)02-0200-06

无人机采用编队飞行可以有效改善目标遗漏、 侦察目标的可靠性、攻击目标的成功率等问题。在 无人机编队巡航任务约束下 通过编队控制策略完 成僚机与长机的编队保持 同时需要重点考虑编队 避撞和编队控制问题。

APF(人工势场法)具有数学描述清晰,计算量 小,实时性强,规划速度快等优点,但其存在固有局 限性(不可达性、局部极小点、震荡问题)^[1],限制了 其优势的发挥。国内外不少专家针对某一点局限提 出改进 但不能从根本上解决 APF 所有的局限性。 就目前研究现状,无人机航迹规划中 APF 一般与 Voronoi 图、进化算法等结合使用,仍具有一定的局 限性。

本文在多无人机紧密编队的情况下,针对传统 APF 应用于航迹规划存在的缺陷进行改进,并成功 用于多机编队航迹规划。

改进的 APF 1

1.1 改进斥力势场函数

传统 APF 中 局部最小问题是由于当无人机靠

近目标时 斥力场不断增强而引力场急剧衰减 使得 无人机不能到达目标。

针对 APF 目标不可达问题, 文献 [2] 对势场函 数作了改进。新的斥力势场函数中加入无人机与目 标之间的相对距离 $\rho_c(q)$,将原有斥力场函数乘以 一个因子($\rho_c(q)$)^{*n*},使得目标位置处斥力为0,从 而确保目标点为整个势场的全局最小点 使无人机 能够顺利到达目标。

改进的斥力场函数为

$$U_{\rm rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}m\left[\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right]^2(\rho_c(q))^n, \rho(q) \leq \rho_0\\ 0, \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$

式中,n为一个大于零的任意实数。与APF的斥力势 函数相比 引入了无人机与目标点之间的相对距离 $\rho_c(q)$ 保证了整个势场仅在目标点全局最小。

此时的斥力为

$$F_{rep}(q) = - \operatorname{grad}(U_{rep}(q))$$

 $= \begin{cases} F_{rep1}(q) + F_{rep2}(q) , \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$

 ρ_0

式中

$$F_{\rm repl}(q) = m \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{1}{\rho^2(q)} \left(\rho_G(q)\right)^n \frac{\partial \rho}{\partial X}$$

收稿日期:2012-06-08

作者简介:杨 洁(1988—) ,女,西北工业大学硕士研究生,主要从事导航与制导研究。

$$\| F_{rep1}(q) \| = m \Big(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \Big) \frac{1}{\rho^2(q)} (\rho_c(q))^n$$

$$F_{rep2}(q) = -\frac{n}{2} m \Big(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \Big)^2 (\rho_c(q))^{n-1} \frac{\partial \rho_c(q)}{\partial X}$$

$$\| F_{rep2}(q) \| = \frac{n}{2} m \Big(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \Big)^2 (\rho_c(q))^{n-1}$$

式中 $F_{rep1}(q)$ 和 $F_{rep2}(q)$ 为 $F_{rep}(q)$ 的 2 个分力: $F_{rep1}(q)$ 指 向 无 人 机; $F_{rep2}(q)$ 指 向 目 标 点。 $||F_{rep1}(q)||$ 和 $||F_{rep2}(q)||$ 分别为各自矢量的模。 无人机在势场中受力如图 1 所示。



图1 受障碍物斥力和目标点吸引力示意图

1.2 随机波动法

当引力和斥力相互角度为 180°, 且斥力和引力 大小达到某个平衡或者接近平衡的时候, 局部极小 情况就会出现。针对 APF 的局部极小点问题, 采用 随机波动法。其大小为 w * || *F*_{att}(*q*) || *w* 为正比 例系数; 方向垂直于无人机当前位置与目标点的连 线,且满足右手法则。无人机在引力函数和斥力函 数的共同作用下飞行,当出现局部极小点时, 引入局 部波动函数帮助无人机脱离该位置, 然后在引力函 数和斥力函数的作用下飞向目标点。

1.3 障碍联通法

无人机的航迹上存在狭窄区域,在引力和斥力 的作用下,容易发生震荡现象,导致无人机左右来回 运动,造成了规划的不稳定。当障碍物比较密集的 时候,采用将障碍物区域联通成一片障碍物的障碍 联通法。仿真实验表明该方法能够很好地解决无人 机航迹规划中的震荡问题^[4,5]。

2 基于 APF 的多无人机编队航迹 规划

首先进行以下假设:

1) 无人机为巡航阶段定高、恒速飞行;

- 2) 威胁分布已知。
- 3) 威胁为敌方雷达。
- 2.1 基于改进 APF 的长机航迹规划

将 Leader-Follower 与人工势场法相结合,进行 多机编队保持。根据无人机编队的习惯叫法^[5],编 队引导控制主要涉及无人机人工势场中的队形势和 队形力。

2.1.1 长机航迹规划算法

长机的 APF 规划算法步骤如下:

Step1 进行航迹预规划,在航迹震荡处,利用 障碍联通法对障碍物进行统筹规划,建立新的环境 模型;

Step2 建立势场模型。确定引力场和斥力场 的正比例位置增益系数 k 和 m ,斥力的影响距离 ρ₀ , 以及移动的步长 ,假设无人机是匀速运动的 ,确定无 人机的起始位置 X ,按照具体的环境信息建立势场 模型:

设长机处于二维搜索空间中的 q 点时,该点的 引力势场函数和斥力势函数分别定义为

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2} k \rho_{G}^{2}(q)$$

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} m \Big[\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_{0}} \Big]^{2} (\rho_{G}(q))^{n} \rho(q) \leq \rho_{0} \\ 0, & \rho(q) > \rho_{0} \end{cases}$$

此时,q 点受到目标点的吸引力和威胁点斥力 分别为该点引力势函数和斥力势函数的负梯度

$$\begin{split} F_{\text{att}}(q) &= - \operatorname{grad}(U_{\text{att}}(q)) &= k\rho_{c}(q) \\ F_{\text{rep}}(q) &= - \operatorname{grad}(U_{\text{rep}}(q)) \\ &= \begin{cases} F_{\text{rep1}}(q) + F_{\text{rep2}}(q) \ \rho(q) \leq \rho_{0} \\ 0, & \rho(q) > \rho_{0} \end{cases} \end{split}$$

式中, $F_{rep1}(q)$ 、 $F_{rep2}(q)$ 方向如图1所示, $\Pi n = 2$ 。 此时,总的势场U为

$$U_{\text{total}} = U_{\text{att}} + \sum_{i=1}^{n} U_{\text{rep}}^{i}$$

引力和斥力的合力为

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}} + \sum_{i=1}^{n} F_{\text{rep}}^{i}$$

式中 n 为障碍物个数。

Step3 根据建立的势场模型计算无人机的受力利用公式计算无人机的合力;

Step4 判读合力是否为 0。如果不为 0,则进 行 Step5;如果为 0,则判断无人机是否到达目标点, 如果到达目标点则结束,如果未到达目标点则按照 随机波动法进行添加附加控制力,重新算得合力为 $F_{\text{total}} = F_{\text{help}} = w * ||F_{\text{att}}||$,方向垂直于无人机当前 位置与目标点的连线,且满足右手法则,转到 Step5。

Step5 按合力的方向运动到下一点 X_i ;

Step6 判断无人机是否满足最大转弯角约束 条件,如果不满足,重新规划*X*; 点;

假设上一步无人机规划位置 *X_i*,当前位置 *X_j*, 下一步规划位置为 *X_i*,且设

 $a = X_i - X_i \ b = X_k - X_i \ c = a \cdot b$

则,当 $\arccos \frac{c}{|a| \cdot |b|} > \theta_0$ 时,无人机不满足 其最大转弯角 θ_0 约束条件,需要重新规划 X_j 点,此

时重新规划。 $X_j = X_i + l \cdot e$ X. + X. - 2 · X.

其中 $\boldsymbol{e} = \frac{X_j + X_k - 2 \cdot X_i}{|X_j + X_k - 2 \cdot X_i|}$,为 $X_i X_j X_k$ 所构成三角形重心的单位向量。

Step7 判断无人机是否到达目标,如果到达,则规划结束;如果没有到达则转Step2 继续执行。

2.1.2 长机的仿真轨迹

实验使用了 100 km × 100 km 二维地形环境图, 和模拟生成的威胁数据。引力系数 k = 1; 斥力系数 m = 1; 威胁最大影响距离 ρ_0 为障碍物半径的一半; 附加控制力的系数 w = 1; 最大转弯角为 $\theta = 45^{\circ}$; 最 小航迹段长度为 length = 0.1 km; d = 3 km; 在使用 该算法进行航迹规划时考虑的静态障碍物,障碍物 1~8 的模型,中心坐标点(km)分别为(25 25)、(48 22)、(50 29)、(45 52)、(57 53)、(80 65)、(70 70)、 (93 97); 半径(km)分别为7、5、10、8、6、4、5、5。

仿真结果如图2和图3所示。

图 2a) 为考虑转弯角约束时,无人机在障碍物 1 影响下的航迹规划,对 A 点放大进行转弯角约束处 理,得到图 2b)。图 2b)中,虚色航迹为不考虑转弯 角约束的,在本文 2.1.1中 Step6 所提出的在转弯 角约束条件下对航迹点进行重规划法,规划出来的 航迹满足了无人机的转弯角约束,第 1 段和第 2 段 航迹转弯角为 49°,大于最大转弯角 45°,航迹段 3、 4、5 也是曲折的;实线航迹为考虑了转弯角约束的 航迹段,第 1 段和第 2 段航迹转弯角为 41°,航迹段 3、4、5 则越来越平滑,改进效果很好。

图 3a) 是利用了改进斥力势场函数并且采用了 随机波动法进行的航迹规划,在障碍物 6、7 之间的 狭窄区域内,无人机航迹发生震荡,无法跳出振荡区 域。图 3b) 是在图 3a) 的基础上,按照障碍物联通



图 3 基于 APF 的长机航迹规划结果图

法对障碍物 6、7 进行统筹规划后,再进行航迹规划 的结果,结果表明,无人机顺利避开障碍物 6、7,并 顺利到达目标点。对于障碍物 8 而言,目标点在障 碍物 8 的影响范围内,如果利用传统的斥力势场函 数,无人机将无法到达目标点,在改进的斥力势场函 数下,可见,无人机顺利绕过障碍物 8 到达目标点。

2.2 基于 APF 的主-僚机编队控制跟随

2.2.1 僚机的势场函数

主从编队控制以长机为队形参考点,在参考点 的基础上,确定僚机的位置,僚机1的预期位置将对 僚机产生吸引作用,这种作用的程度以队形势表示, 并通过队形力来实现,迫使其逼近预期位置。与此 同时,编队内其他僚机对僚机1也起到一种编队约 束作用,当某飞机的实际位置在编队队形内部时,受 到编队向外的推力;当在编队队形外部时,受到同编 队向内的引力。

编队中第 i 架僚机的队形势为

 $U_i = \frac{1}{2}k \parallel \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^{\mathrm{G}} \parallel^2$

式中 $\mathbf{p}_i = [\mathbf{x}_i, y_i, z_i]$ 为无人机 i 的位置; $\mathbf{p}_i^c = [\mathbf{x}_g, y_g, z_g]$ 表示无人机 i 的预定位置期望值。

队形力为队形势的负梯度,有

 $F_i = - \operatorname{grad} U_i = -k \parallel \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^G \parallel$

当僚机 i 位于其目标点 $\mathbf{p}_i^c = [\mathbf{x}_{g, N_g, Z_g}]$ 时,队 形势为0 队形力也为0; 当僚机 i 与其目标点距离增 大时,队形势增大,队形力也增大。僚机受到的队形 力是相对于预定位置而言的,预定位置是僚机 i 的 平衡点,即队形控制的目标点。

2.2.2 编队控制下的仿真轨迹

僚机跟随长机保持队形,实时跟踪长机。实际 系统中,僚机测得长机的导航位置信号 根据固定的 *l*和 φ,求出自己当前应该处的位置,由僚机的势场 函数进行跟随。

算法步骤:

Step1 APF 规划出长机的航迹点 *Xl*_{current};

Step2 利用编队队形 $l \ \pi \varphi$ 算出当前僚机所在的理论位置 X_{fl}_{theory} ;

Step3 僚机的前一位置 Xfl_{former};

Step4 利用队形力将僚机"拖向"僚机的理论 位置 $Xf1_{former} \rightarrow Xf1_{theory}$,得到 $Xf1_{current}$;

 Step5
 转到步骤
 Step1
 进行下一航迹点的

 规划;

实验使用了 100 km × 100 km 二维地形环境图,

和模拟生成的威胁数据。参数 $k_{n}, m_{n}, \rho_{0}, w_{n}, \theta_{n}, d$ 同 2.1.2节 其它相关参数如下: $l_{1} = 2 \text{ km } \phi_{1} = 45^{\circ}; l_{2}$ = 1 km $\phi_{2} = 30^{\circ}$ 。

在以上的仿真条件下得到如图 4、图 5 和图 6 的仿真结果。



图 5 障碍物环境下的编队轨迹

图 4 为取平面 10 km × 10 km 范围内的仿真图 形,显示了在无障碍物影响的情况下,僚机跟随长机 的轨迹,时刻保持队形。

图 5 为取平面 10 km × 10 km 范围内的仿真图

形,显示了障碍物环境下的僚机航迹跟随情况,其 中 图 5a)为不考虑转弯角约束时的轨迹图,可见此 时僚机跟随航迹有明显的折线情况,显然不满足无 人机的机动特性要求,需将其进行优化;图 5b)是在 考虑了转弯角约束情况下的轨迹图,较图 5a)可见 明显平滑了许多,主-僚机的航迹均满足飞机的机动 性能要求,在障碍物附近,队形将出现变化,但是仍 能满足编队队形之间的安全要求,越过障碍物影响 区域队形恢复。



图6 主-僚机编队控制跟随下的仿真航迹

图 6 为主-僚机编队在 100 km × 100 km 范围内 的仿真轨迹,在多障碍物的影响下,可见主-僚机能 够保证一定的队形,到达目标点。但是此时,僚机并 不能避开障碍物影响,如在障碍物 8 处,僚机 1 已经 碰上障碍物,显然不满足避障要求,基于此,我们需 考虑多机编队避障问题。

3 多无人机编队避障

为了保证多机编队成功避障,对障碍物进行 "膨胀"处理,所谓障碍物膨胀就是将障碍物的边界 向外扩展。设编队中各僚机与长机的距离最长者为 r,以r为膨胀的距离,对多边形障碍物进行膨胀,膨 胀后的障碍物即为多机编队避障所需考虑的新的威 胁。按新的威胁大小规划出来的航迹离真实威胁较 远,这样多机编队的航迹规划问题,可以转化为质点 导航问题。 实验使用了 100 km × 100 km 二维地形环境图 和模拟生成的威胁数据,其中,障碍物 1 ~ 8 的模型 同 2.1.2 节。参数 $k_{n}\rho_{0}$, $w_{n}\theta_{n}d_{n}l_{1}$, ϕ_{1} , l_{2} , ϕ_{2} 同 2.2.2 节,其它相关参数如下: 障碍物膨胀半径为 r= 2 km

在以上的仿真条件下得到如图 7 所示的仿真 结果。



图 7 多机编队仿真轨迹

图 7 中,实线圆圈表示原始障碍物模型,虚线圆 圈表示膨胀后的障碍物模型;实线为主机的航迹,短 虚线为僚机1的航迹,长虚线为僚机2的航迹。在 障碍物7 附近,僚机2的航迹很贴近膨胀后的障碍 物,但是离实际的障碍物还有一段距离,能够安全避 开障碍物,在障碍物8 处,僚机1甚至碰撞到膨胀障 碍物8,但是能够避开实际障碍物的影响。由此可 见,进行障碍物膨胀后,规划出来的航迹满足多机编 队避障需求。

4 结 论

本文在基于 APF 的航迹规划方法上,针对多无 人机编队航迹规划问题进行了研究。通过在传统 APF 的基础上加以改进,给出了一种多无人机编队 航迹规划算法,具有如下特点:将多机编队航迹规划 过程系统化;规划出的航迹满足无人机的机动约束; 能够满足实时在线应用要求。实验结果表明,本文 算法能够简洁有效地生成多条航迹,并实现队形控 制和编队避障的要求,也可用于实时航迹规划中。

参考文献:

- [2] 王会丽,傅卫平,方宗德等. 基于改进的势场函数的移动机器人路径规划. 陕西: 机床与液压, 2002, (6): 67-68 Wang Huili, Fu Weiping, Fang Zongde, et al. A Path Plan Method for Mobile Robot Based on Improved Potential Field Function (in Chinese)
- [3] 段 华 赵东标. 动态环境下基于势场原理的避障方法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 40-42 Duan Hua, Zhao Dongbiao. Potential Field-Based Obstacle Avoidance Algorithm for Dynamic Environment (in Chinese)
- [4] 李晓丽,谢 敬,傅卫平等.一种改进势场法在多移动机器人避碰规划中的应用.计算机工程与应用,2005,41(17): 56-58
 Li Xiaoli, Xie Jing, Fu Weiping, et al. An Evolutionary Artificial Potential Field Method Used to Obstacle-Avoidance Planning

of Multiple Mobile Robots (in Chinese)

- [5] 石为人,黄兴华,周 伟. 基于改进 APF 法的移动机器人路径规划. 计算机应用, 2010, 30(8): 2021-2023 Shi Weiren, Huang Xinghua, Zhou Wei. Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Artificial Potential Field (in Chinese)
- [6] Wang P K C. Navigation Strategies for Multiple Autonomous Mobile Robots Moving in Formation. Journal of Robotic Systems, 1991 8(2): 177-195
- [7] 任德华,卢桂章. 对队形控制的思考. 控制与决策, 2005, 20(6): 602-605 Ren Dehua, Lu Guizhang. Thinking in Formation control. Control and Decision, 2005, 20(6): 602-605 (in Chinese)
- [8] 魏贤智 庞春雨 孙 亮等. 战斗机人工势场在主从编队引导控制中的应用. 电光与控制, 2010, 17(3): 51-55 Wei Xianzhi, Pang Chunyu, Sun Liang, et al. Application of Fighter Artificial Potential Field in Leader-Follower Formation Guidance Control (in Chinese)
- [9] Bortoff, Scott A. Path Planning for UAVs. American Control Conference, Chicago, JL, United States, 2000, 28-30: 364-368
- [10] Kingston D, Beard R, McLain T, et al. Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed Wing UAVs. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2005, 2(1): 92-408
- [11] Chandler P R, Rasmussen S, Pachter M. UAV Cooperative Path Planning. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, Co, United States, 2000, 43-70

Route Planning of UAV Formation Based on Improved APF

Yang Jie, Wang Xinmin, Xie Rong

(Department of Automatic Control , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

Abstract: There exist such problems as target unreachability, local minima and oscillation when traditional APF is applied to route planning. We propose an improved APF model and then the method using this model, whose core consists of: (1) with the adoption of improved repulsive potential function, with the relative distance between the UAV and the target taken into consideration, and with making sure that the point of target be the global minimum point in the entire potential field, we can solve the problem of target unreachability caused by the too close distance between threat and target point; (2) We solve the problem of planning failure caused by UAV's falling into local minimum point by adopting random fluctuation method; (3) We propose the obstacle link method by taking the oscillation of traditional potential field into account. At the same time, we adopt APF to implement formation control in order to maintain UAV formation distance for UAVs very near each other in formation. The results of the simulation indicate that our method can implement the path planning of UAV formation very well.

Key words: algorithms, collision avoidance, computer simulation, flowcharting, mathematical models, targets, unmanned aerial vehicles(UAV); APF, obstacle link method, random fluctuation method, route planning of UAV formation

第2期