

基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法



高璟^{1,2}, 张磊³, 胡高歌^{1,2}, 杨子江^{1,2}, 高兵兵^{1,2}

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

3. 航空工业西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要:航迹规划是实现无人机自主导航飞行的关键。针对人工势场法应用于无人机航迹规划时出现的规划失败、实用性不强的问题,本文提出一种基于平面约束人工势场的航迹规划算法。首先,利用约束平面切割障碍物,简化了障碍物的分布。其次,构建航迹的可行性约束条件,并建立了基于约束平面的人工势场法。最后,综合并改进了一种额外控制力法和常用的改进势场函数。仿真验证表明,该算法克服了传统人工势场法未考虑无人机物理性能限制、易陷入局部最小值以及目标不可达的问题,同时提高了航迹规划质量。通过本文研究,人工势场法的不足得到了改善,有利于人工势场法在无人机航迹规划领域的应用与发展。

关键词:无人机; 航迹规划; 人工势场法; 避障; 额外控制力法

中图分类号: V249

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.009

无人机具有尺寸小、成本低、使用灵活、适用范围广、生存能力强等优点,因此广泛应用于军事、农业、交通等领域^[1-2]。然而,随着无人机飞行环境和所承担任务的复杂性逐渐增加,作为实现其自主导航飞行的关键,航迹规划的难度也日益增大,已成为制约无人机发展的技术瓶颈之一^[3-4]。

航迹规划是指根据飞行任务的需要,设计出一条从起点到目标点的最优飞行轨迹,要求符合无人机物理性能约束并使综合代价最小。目前,国内外学者已经提出许多航迹规划方法,如A*算法、快速搜索随机树(RRT)算法、蚁群算法、粒子群算法、人工势场法等。A*算法通常能规划出具有最短航线长度的航迹,但计算时间随问题规模增长呈指数级增加^[5-6]。RRT算法无须对系统进行建模,能实时快速地完成航迹规划,但存在随机性高、路径并非最优等问题^[5,7]。蚁群算法具有鲁棒性强、信息反馈好等优点,但算法效果过于依赖参数的选择、易陷入局部最优解^[8]。

粒子群算法原理简单、执行优化任务时效果好,但容易过早收敛,陷入局部最优^[9-10]。相比而言,人工势场法结构简单,具有规划速度快、航迹平滑、安全性高等优点,因此在航迹规划领域得到了广泛应用^[11]。

传统人工势场法也存在未考虑无人机物理性能限制、易陷入局部最小值、目标不可达等问题,最终导致航迹规划失败或规划结果实用性不高。因此,国内外学者提出了许多优化算法。文献[12]研究了同时存在硬障碍物和软障碍物环境下的无人机航迹规划问题,通过引入基于某些标准(如生存概率)的额外控制量将原问题转化为多目标优化问题,并利用该额外控制量有效避免了局部最小值的产生。针对目标不可达问题,文献[13]提出一种考虑了无人机与目标之间相对距离的改进势场函数,使无人机能顺利抵达目标点。这是一种常用的改进人工势场法,已被诸多文献采用和优化^[14-16]。文献[17]考虑了实际应用中无人机或障碍物位置定位不精确的问题,提

收稿日期: 2023-04-28; 退修日期: 2023-06-20; 录用日期: 2023-07-11

基金项目: 航空科学基金(20200019053003, 20181953021); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-375); 深圳市科技计划(JCYJ20210324121602008)

引用格式: Gao Xun, Zhang Lei, Hu Gaoge, et al. UAV path planning method based on plane-constrained artificial potential field [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(08): 68-76. 高璟, 张磊, 胡高歌, 等. 基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法 [J]. *航空科学技术*, 2023, 34(08): 68-76.

出一种混合了定位风险场和人工势场的航迹规划方法,生成的航迹更安全有效。然而文献[12]、[13]和[17]均专注于局部最小值、目标不可达等问题,却忽视了或者没有充分考虑无人机的物理性能限制,尤其是高度方向上的物理性能限制。

为了解决上述问题,本文提出一种基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法。该算法定义了一个特殊平面为约束平面,并利用该约束平面切割障碍物,简化了障碍物的分布;建立了基于约束平面的人工势场法,利用约束平面和水平面的关系,使航迹规划结果满足了可行性约束条件;综合并改进了额外控制力法^[18]和文献[13]提出的势场函数,以克服易陷入局部最小值、目标不可达的不足。最后,本文通过仿真试验对比了基于约束平面的人工势场法、文献[13]提出的改进人工势场法、传统人工势场法在面对无人机物理性能限制、局部最小值、目标不可达等问题时的性能,验证了所提出算法的有效性。

1 传统人工势场法的缺陷

人工势场法应用于航迹规划领域时,主要原理是将无人机和飞行空间分别抽象为一个质点和一个虚拟势场,进而将航迹规划问题转化为质点在势场中的运动问题。

定义 q 、 q_g 、 q_{ob} 分别为无人机、目标点、障碍物的 1×3 位置矩阵。传统人工势场法中当前时刻无人机处的引力势场和斥力势场分别被定义为^[19]

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}k\rho^2(q, q_g) \quad (1)$$

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}m\left(\frac{1}{\rho(q, q_{ob})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \rho(q, q_{ob}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{ob}) > \rho_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 和 m 是引力增益系数和斥力增益系数; $\rho(q, q_g)$ 和 $\rho(q, q_{ob})$ 分别为无人机到目标点和障碍物的距离; ρ_0 是障碍物最大影响距离。

传统人工势场法的主要缺陷有:一是目标不可达。当目标在障碍物的影响范围之内时,随着无人机向目标的逼近,式(2)中的障碍物势场会快速增加,致使整个势场的全局最小点并不是目标点,此时势场中无人机无法靠近、抵达目标点,航迹规划失败。二是易陷入局部最小值。势场产生的引力和斥力合力角度相差为 180° ,且斥力和引力大小达到某个平衡或者接近平衡时,算法会产生局部最小值,此时无人机停留原地、无法继续前进,航迹规划失败。三是未考虑无人机物理性能限制:式(1)、式(2)建立人工势场时未考虑

物理性能限制,导致无人机无法按照预定航线飞行,此时航迹规划结果不具有可行性。航迹能够被无人机执行是保证航迹规划算法实用性的前提,而无人机的物理性能限制与航迹的可行性密切相关,它包括无人机高度限制、最大俯仰角等^[20-21]。

2 基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法

2.1 航迹可行性约束条件的构建

本文以固定翼无人机为研究对象,采用以油门杆、升降舵、副翼、方向舵控制无人机质心位移、绕质心转动的模型,并规定无人机近似匀速飞行。受无人机的物理性能限制,三维环境下航迹为了保证可行性,必须满足以下约束条件。

(1) 航迹高度约束

为了保证无人机的安全或由于执行任务的需要,飞行高度通常限制在两个给定的极值之间,即最小和最大高度。如在测量和搜索应用中,需要相机以特定的分辨率和视野收集视觉数据,从而限制飞行高度^[20]。因此,算法得到的航迹上任意一点高度 h_i 应当满足

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \quad (3)$$

式中, h_{\min} 、 h_{\max} 分别为无人机被允许达到的最小和最大的高度值。

(2) 航迹与水平面夹角约束

无人机通过油门杆、升降舵、副翼、方向舵对自身状态的控制是有限度的。当无人机大角度爬升或俯冲时,容易失去控制,陷入失速状态。失速状态下的无人机会不受控制地俯冲和颠簸,造成人身伤害或财产损失^[21]。因此,应当约束航迹和水平面的夹角,从而限制执行航迹所需的无人机俯仰角。则任意一段航迹和水平面的夹角 θ_i 应当满足

$$|\theta_i| \leq |\theta_{\max}| \quad (4)$$

式中, θ_{\max} 是无人机维持控制所能达到的最大俯仰角。

2.2 障碍物模型的建立

无人机飞行时会遭遇一些无法穿越或存在危险的障碍物,因此在航迹规划之前必须对障碍物进行合理的描述。本文采用几何图形来建立障碍物模型,并通过包裹、连锁、膨胀处理将障碍物分布从密集复杂变得简单方便,解决了人工势场法有时因障碍物过于密集而无法完成航迹规划任务的问题。

处理过程如图1所示,将两个不规则障碍物优化为了圆形障碍物。在三维环境下,包裹、连锁、膨胀处理后得到的是球形障碍物。图1中, r_1 、 r_2 分别为障碍物1、2中心到

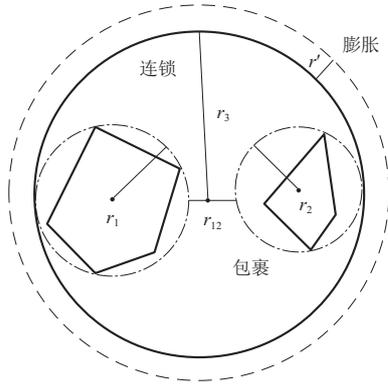


图1 包裹、连锁、膨胀处理过程

Fig.1 The process of wrapping, interlocking, and expanding

边界的最大距离; r_{12} 是包裹处理后两圆形障碍物之间的距离; r_3 为连锁处理后得到的障碍物半径; r' 为膨胀处理时半径扩大的增量。

包裹处理:以不规则障碍物为对象,将不规则障碍物优化为圆形/球体障碍物。连锁处理:以包裹后 $r_{12} \leq 2\rho_0$ 的密集障碍物为对象,优化为一个较大的障碍物。若包裹后 $r_{12} > 2\rho_0$,则跳过连锁处理。膨胀处理:包裹和连锁(或跳过连锁)处理后,为降低无人机与障碍物碰撞的概率,拓展所有障碍物的边界。

优化处理后的障碍物半径为

$$\begin{cases} R = \frac{r_{12}}{2} + r_1 + r_2 + r', & r_{12} \leq 2\rho_0 \\ R_1 = r_1 + r', & R_2 = r_2 + r', & r_{12} > 2\rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为两障碍物包裹、连锁、膨胀处理后的半径; R_1, R_2 分别为两障碍物包裹、膨胀处理后的半径。

2.3 平面约束人工势场的建立

平面约束人工势场的建立分为三步:约束平面切割障碍物、约束平面限制人工势场和结合额外控制力法。

(1)约束平面切割障碍物的过程

定义约束平面 α 必须包含起始点 $S(x_s, y_s, z_s)$ 、目标点 $E(x_e, y_e, z_e)$,且约束平面 α 和水平面的交线须垂直于起始点 S 到目标点 E 的连线 l_{sc} 。则约束平面 α 的表达式为

$$(x_e - x_s)(z_e - z_s)(x - x_s) + (y_e - y_s)(z_e - z_s)(y - y_s) - [(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2](z - z_s) = 0 \quad (6)$$

确定约束平面并切割障碍物的过程如图2所示。图2中, $ob(x_{ob}, y_{ob}, z_{ob})$ 是障碍物球心; R 是障碍物半径; ob' 是障碍物被约束平面切割后得到的圆形切面的圆心; r 是圆形切面的半径; P 是无人机当前时刻的位置点。圆形切面的参数 ob', r 是建立基于约束平面的人工势场的关键参数。根据已知

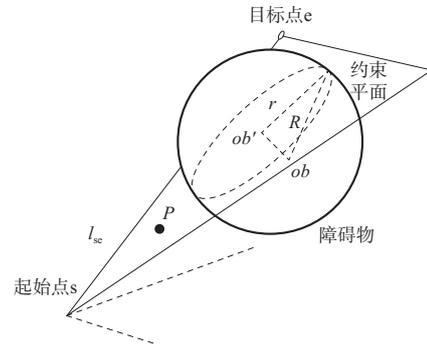


图2 确定约束平面并切割障碍物

Fig.2 Determining the constraint plane and cutting obstacles

量 ob, R, S, E 求未知量 ob', r 的过程如下。

约束平面和障碍物球心的距离为

$$d = \frac{\left| \begin{array}{l} (x_e - x_s)(z_e - z_s)(x_{ob} - x_s) + \\ (y_e - y_s)(z_e - z_s)(y_{ob} - y_s) - \\ [(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2](z_{ob} - z_s) \end{array} \right|}{\sqrt{\begin{array}{l} (x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 + \\ (z_e - z_s)^2 + \\ [(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2]^2 \end{array}}} \quad (7)$$

约束平面切割障碍物会出现两种情况。若 $d - R > 0$,此时约束平面实际和球形障碍物不接触,则该障碍物不产生斥力势场,即在规划航迹时认为该障碍物不存在。若 $d - R \leq 0$,球形障碍物被约束平面切割成圆形,则 r 为

$$r = \sqrt{R^2 - d^2} \quad (8)$$

此时,为确定切面圆心,建立一个原点不变但 xoy 平面平行于约束平面的新坐标系,则新坐标系的三个基矢量为

$$\mathbf{a}_x = \frac{(x_e - x_s \quad y_e - y_s \quad z_e - z_s)}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 + (z_e - z_s)^2}} \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_y = \frac{(y_e - y_s \quad x_s - x_e \quad 0)}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2}} \quad (10)$$

$$\mathbf{a}_z = \frac{\mathbf{a}_x \times \mathbf{a}_y}{\|\mathbf{a}_x \times \mathbf{a}_y\|} = \frac{\begin{pmatrix} (x_e - x_s)(z_e - z_s) \\ (y_e - y_s)(z_e - z_s) - \\ (x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 \end{pmatrix}^T}{\sqrt{\begin{array}{l} (x_e - x_s)^2 + \\ (y_e - y_s)^2 + \\ (z_e - z_s)^2 \end{array}} \sqrt{\begin{array}{l} (x_e - x_s)^2 + \\ (y_e - y_s)^2 \end{array}}} \quad (11)$$

原坐标系相同 x, y 坐标下,障碍物球心和约束平面上的点之间的 z 坐标差值为

$$\Delta z = z_{ob} - \frac{(x_e - x_s)(z_e - z_s)(x_{ob} - x_s) + (y_e - y_s)(z_e - z_s)(y_{ob} - y_s)}{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2} - z_s \quad (12)$$

圆形切面的圆心 ob' 在新坐标系下的坐标为

$$\begin{aligned} (x_{new}', y_{new}', z_{new}') = & \\ & \begin{cases} \left(\left(\alpha_x^T, \alpha_y^T, \alpha_z^T \right)^{-1} \begin{pmatrix} x_{ob} \\ y_{ob} \\ z_{ob} \end{pmatrix} \right)^T + (0, 0, -d), & \Delta z > 0 \\ \left(\left(\alpha_x^T, \alpha_y^T, \alpha_z^T \right)^{-1} \begin{pmatrix} x_{ob} \\ y_{ob} \\ z_{ob} \end{pmatrix} \right)^T + (0, 0, d), & \Delta z \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

则圆心 ob' 在原坐标系下坐标为

$$(x_{ob}', y_{ob}', z_{ob}') = \left(\alpha_x^T, \alpha_y^T, \alpha_z^T \right) \begin{pmatrix} x_{new}' \\ y_{new}' \\ z_{new}' \end{pmatrix} \quad (14)$$

(2) 约束平面限制人工势场的过程

为了克服目标不可达的缺陷, 本文采用了文献[13]提出的势场函数作为优化基础。限制文献[13]中的人工势场仅产生在约束平面上, 因此在引力、斥力作用下, 无人机的航迹也同样在约束平面内。

被平面约束后的人工势场为

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k \rho^2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_g), & P \in \alpha \\ 0, & P \notin \alpha \end{cases} \quad (15)$$

$U_{rep}(\mathbf{q}) =$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \cdot \frac{m}{2} (\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_g))^n, & \rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob}) \leq \rho_0, \\ & P \in \alpha \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $U_{att}(\mathbf{q})$ 为平面约束后的引力场; $U_{rep}(\mathbf{q})$ 为平面约束后的斥力场。

基于约束平面的人工势场产生的引力、斥力为

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{q}) = \begin{cases} k(\mathbf{q}_g - \mathbf{q}), & P \in \alpha \\ 0, & P \notin \alpha \end{cases} \quad (17)$$

$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{rep}(\mathbf{q}) =$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{rep1} \mathbf{n}_{op} + \mathbf{F}_{rep2} \mathbf{n}_{pg}, & \rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob}) \leq \rho_0, P \in \alpha \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\mathbf{F}_{rep1} = m \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{(\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_g))^n}{\rho^2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob})} \quad (19)$$

$$\mathbf{F}_{rep2} = \frac{nm}{2} \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{ob})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 [\rho(\mathbf{q}, \mathbf{q}_g)]^{n-1} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})$ 为引力, 从无人机指向目标点; \mathbf{n}_{op} 和 \mathbf{n}_{pg} 为两单位矢量, 分别从障碍物切面指向无人机、从无人机指向目标点。

同时, 需要指出的是, 此时障碍物已经被约束平面切割, 从球形变成了圆形切面。因此在式(15)~式(20)所涉及的计算过程中, 障碍物参数均使用 r 和 ob' 的数据。

(3) 结合额外控制力法的过程

添加一个额外控制力改变合力方向, 能够有效摆脱局部最小值点^[12,18]。本文结合了文献[18]的做法, 基本思想是在原有的引力函数和斥力函数的基础上, 引入额外控制力 \mathbf{F}_{extra} , 则 \mathbf{F}_{extra} 满足

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{extra} \perp \mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) \\ \|\mathbf{F}_{extra}\| = \|\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q})\| \\ \mathbf{F}_{extra} \subset \alpha \end{cases} \quad (21)$$

当无人机在飞行过程中出现局部最小值点时, 立刻引入额外控制力对无人机进行引导, 使无人机快速摆脱平衡点并在原有势场力的引导下继续飞向目标点。此时势场中无人机所受合力为

$$\mathbf{F}_{sum}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) + \sum_{i=1}^s \mathbf{F}_{rep_i}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{extra} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{F}_{rep_i}(\mathbf{q})$ 表示无人机受到第 i 个障碍物的斥力; s 为障碍物的数量。

3 航迹规划算法分析

基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法的优势主要体现在克服了未考虑无人机物理性能限制、易陷入局部最小值、目标不可达的问题, 并且能提高航迹规划质量。

3.1 无人机物理性能限制

基于约束平面的人工势场、传统人工势场法以及文献[13]的改进人工势场法航迹规划过程的对比如图3所示。

图3中, 蓝色实线是传统人工势场法或改进人工势场法规划得到的航迹; 红色实线是基于约束平面的人工势场法规划得到的航迹, 在遭遇障碍物之前和蓝色实线重合; $\Delta\theta$

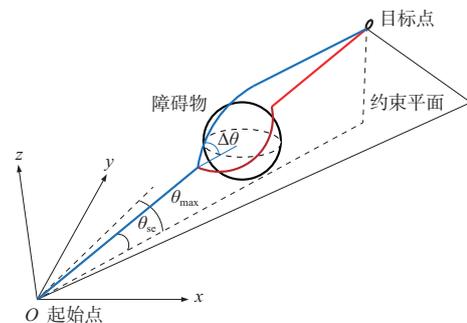


图3 航迹规划对比

Fig.3 The comparison between flight path planning results

是蓝色航线在障碍物附近时,与水平面夹角的增量; θ_{se} 是水平面与约束平面的二面角。

图3中无人机在蓝色航线中飞行时,在目标点势场作用下具有一定的俯仰角初值 $\theta_0 \approx \theta_{se}$,并且在障碍物的附近势场作用下进一步增大俯仰角 $\Delta\theta$ 。由图3可知,未考虑无人机性能限制带来了三方面的风险:(1)若 θ_0 接近 θ_{max} ,则 $\theta_0 + \Delta\theta > \theta_{max}$,无人机大角度爬升以接近目标点,易陷入失速状态,不满足航迹与水平面夹角约束;(2)若 $\Delta\theta$ 过大,即 $\Delta\theta > \theta_{max} - \theta_0$,无人机因避障需求迅速大角度抬高,同样不满足航迹与水平面夹角约束;(3)无人机在障碍物附近的避障需求可能使高度过多地增大或降低,不满足航迹高度约束。

而基于约束平面的人工势场法产生的红色航迹一定位于约束平面上,因此根据最大角定理(二面角是平面内的直线与另一个平面所成角的最大角),航迹一定满足

$$|\theta_i| \leq |\theta_{se}| < \theta_{max} \quad (23)$$

从式(23)可以看出,此时任意一段红色航迹一定满足航迹与水平面夹角约束。

同时,无人机飞行至障碍物附近时,基于约束平面的人工势场作用下,无人机从侧面绕过障碍物,不会因避障需求大幅增加或减少高度,此时航迹和水平面夹角的变化也较平缓。因此,航迹也一定满足

$$h_{min} < \min(z_e, z_s) \leq h_i \leq \max(z_e, z_s) < h_{max} \quad (24)$$

从式(24)可以看出,此时任意一段航迹也一定满足航迹高度约束。

综上所述,基于平面约束人工势场的无人机航迹规划算法满足航迹可行性约束条件,克服了未考虑物理性能限制的问题,因此具有更强的实用性。

3.2 局部最小值和目标不可达

因为事先对障碍物进行了连锁处理,密集障碍物被优化为一个较大的障碍物,所以局部最小值的产生不会来自密集障碍物,都是由 $F_{att}(q) = -F_{rep}(q)$ 造成的。因此本文在2.3节中,通过添加额外控制力 F_{extra} 能有效克服传统人工势场法或改进人工势场法易陷入局部最小值的问题。

对比式(2)和式(16)可以看出,本文建立斥力人工势场的过程中,和改进人工势场法一样,也引入了无人机与目标之间相对距离 $\rho(q, q_g)$,因此继承了文献[13]能克服目标不可达问题的优点。

3.3 航迹规划质量

约束平面切割障碍物的过程中,会出现如图4所示的

两种情形。

障碍物2和约束平面不相交,则该障碍物不产生斥力势场,即在规划航迹时认为该障碍物不存在。这种情况的存在能有效减少障碍物的数量,进而减少航迹长度、提高规划成功率。另一种情况是障碍物1则被约束平面切割成圆形,则圆形切面的半径 r 一定满足 $r \leq R$,这种情况下障碍物半径被缩小,因此减少了避障需求对航迹的影响,进而减少航迹长度、提高目标的可达性。

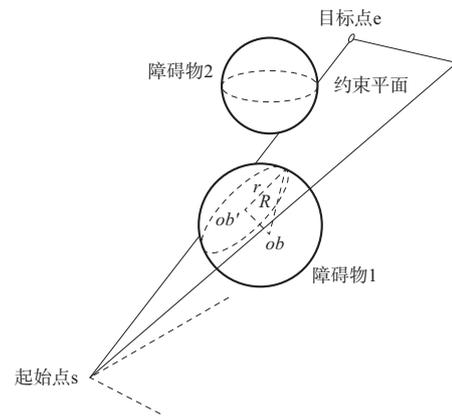


图4 切割障碍物的过程

Fig.4 The process of cutting obstacles

4 航迹规划仿真

4.1 仿真参数

将基于约束平面的人工势场法与传统人工势场法、文献[13]的改进人工势场法进行对比试验。三种算法基本参数见表1。

表1 人工势场法基本参数

Table 1 Basic parameters of the artificial potential field method

	k	m	n	ρ_0/m
基于约束平面的人工势场法	15	10^5	0.5	110
传统人工势场法	15	10^{10}	—	110
文献[13]的改进人工势场法	15	10^5	0.5	110

在无人机物理性能限制、局部最小值、目标不可达的相关问题上,为验证所提出算法的性能,并比较三种算法的实用性、航迹规划质量,分别设置不同的环境参数,见表2~表4。表2中,障碍物2、3经过连锁处理后简化为了一个障碍物。表3、表4中,为了方便观察,将起始点、目标点、障碍物球心均设置在同一高度,此时航迹规划问题的环境实际简

表2 和无人机物理性能限制有关的环境参数

Table 2 The environment parameters related to physical constraints of unmanned aerial vehicles

	X轴位置/m	Y轴位置/m	Z轴位置/m	半径/m
起始点	0	0	0	—
目标点	2000	2000	200	—
障碍物1	510	500	70	35
障碍物2	1200	1170	50	30
障碍物3	1270	1.25	120	5
障碍物4	1700	1700	70	70
障碍物5	800	700	35	35

表3 和局部最小值有关的环境参数

Table 3 The environment parameters related to local minima

	x轴位置/m	y轴位置/m	z轴位置/m	半径/m
起始点	0	0	100	—
目标点	2000	2000	100	—
障碍物1	1000	1000	100	100

表4 和目标不可达有关的环境参数

Table 4 The environment parameters related to unreachable goals

	x轴位置/m	y轴位置/m	z轴位置/m	半径/m
起始点	0	0	100	—
目标点	2000	2000	100	—
障碍物1	900	1000	100	100
障碍物2	2000	2100	100	50

化为了二维,约束平面就是该高度的水平面。因此在仿真结果中,不给出三维环境下才有意义的航迹与水平面的夹角变化曲线、航迹高度变化曲线。

4.2 仿真结果与分析

无人机物理性能限制相关环境参数(见表2)得到的仿真结果如图5所示。由图5可知,基于约束平面的人工势场法得到的航迹仅需无人机做出两个简单的转弯机动,即可躲避障碍物到达目标点。可以看出,基于约束平面的人工势场法能得到更简单实用的航迹,节约了无人机的飞行资源。航迹与水平面的夹角变化曲线、航迹高度变化曲线,如图6、图7所示。基于约束平面的人工势场法曲线变化平缓,满足了无人机物理性能限制,因此实用性更好。而传统人工势场法和改进人工势场法航迹与水平面的夹角变化剧烈,最大值分别达到了-1.074~1.162rad,明显超出了常用无

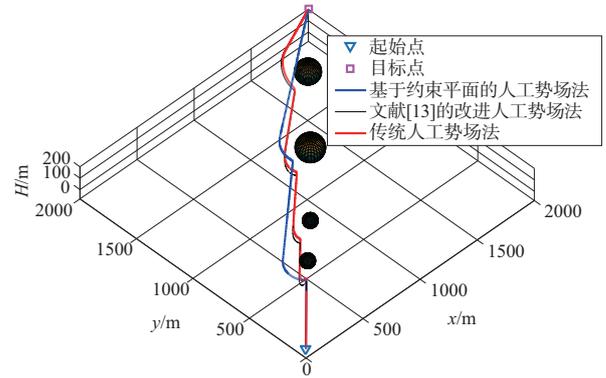


图5 和无人机物理性能限制有关的仿真结果
Fig.5 The simulation results related to physical constraints of unmanned aerial vehicles

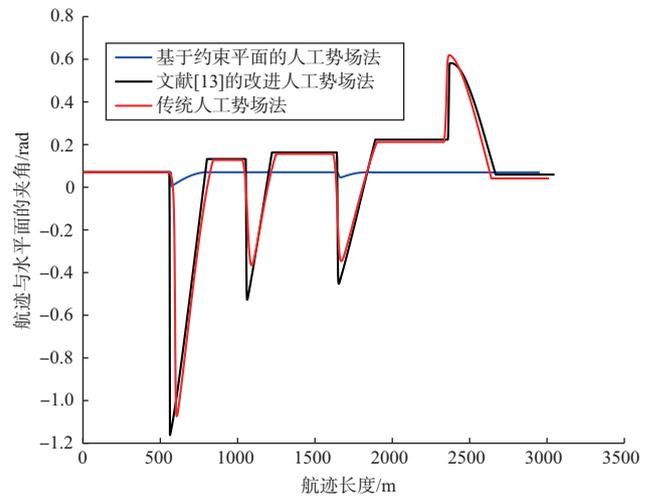


图6 航迹与水平面的夹角变化曲线
Fig.6 The change curve of the angle between the flight path and the horizontal plane

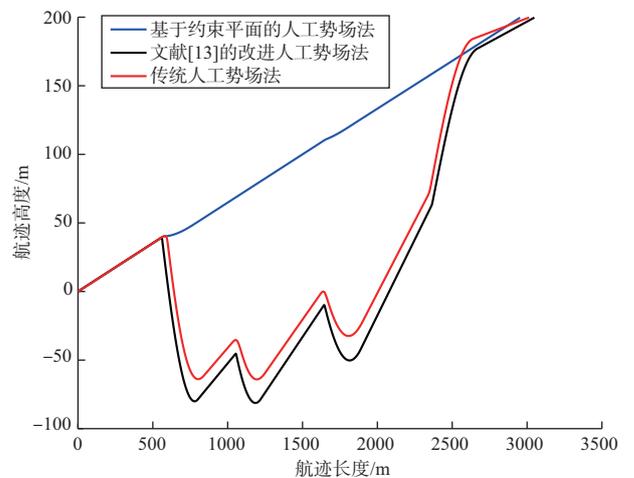


图7 航迹高度变化曲线
Fig.7 The change curve of the flight path height

人机维持控制所能达到的最大俯仰角;高度最低时分别达到了-64.07m、-81.26m,明显超出了起始点到目标点的高度范围0~200m,有超出航迹高度约束的风险。

同时,基于约束平面的人工势场法、传统人工势场法以及改进人工势场法的航迹总长度分别为2.95km、3.01km、3.05km。相比于传统人工势场法和改进人工势场法,基于约束平面的人工势场法分别减少了2.00%、3.28%的航迹长度,提高了航迹规划质量。局部最小值相关环境参数(见表3)得到的仿真结果如图8所示。

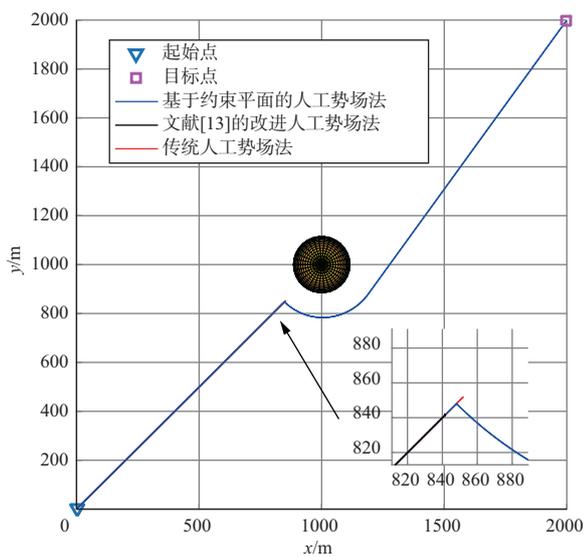


图8 和局部最小值有关的仿真结果

Fig.8 The simulation results related to local minima

由图8可知,改进人工势场法和传统人工势场法分别在(841.5m 841.5m 100m)、(851.7m 851.7m 100m)处陷入局部最小值,航迹规划失败。而基于约束平面的人工势场法能克服局部最小值,顺利完成了航迹规划任务。此时,基于约束平面的人工势场法得到的航迹总长2.97km。

目标不可达相关环境参数(见表4)得到的仿真结果如图9所示。传统人工势场法在(1999m 1927m 100m)处由于障碍物2的影响而无法抵达目标点,此时距离目标点还有73.01m。但基于约束平面的人工势场法和改进人工势场法均能完成航迹规划。

同时,基于约束平面的人工势场法、改进人工势场法的航迹总长度分别为2.90km、2.91km。结合图9航迹可知,在二维环境下,若两种算法都能完成航迹规划任务,则它们的规划结果是相似的。

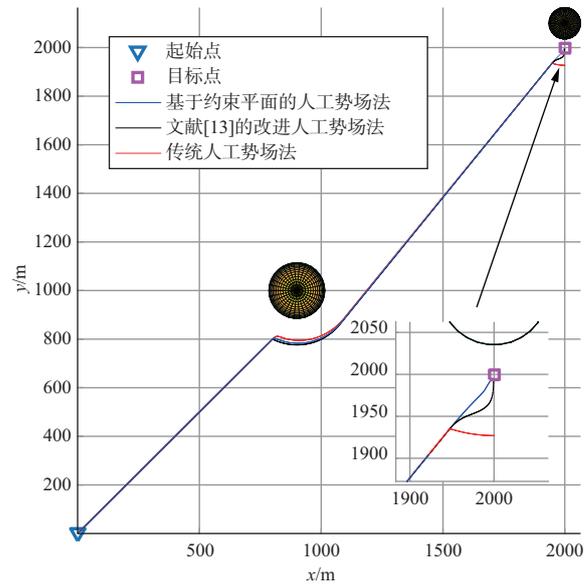


图9 和目标不可达有关的仿真结果

Fig.9 The simulation results related to unreachable goals

5 结论

本文针对传统人工势场法存在的规划失败、实用性不强的问题,提出一种基于平面约束人工势场的航迹规划算法。本文创新性在于通过利用约束平面切割障碍物提高了航迹规划质量;通过建立基于约束平面的人工势场克服了未考虑无人物理性能限制的问题;通过综合并改进一种额外控制方法和常用的改进势场函数,克服了易陷入局部最小值以及目标不可达的问题。经仿真验证,相比于传统人工势场法和文献[13]的改进人工势场法,基于约束平面的人工势场法顺利地完成了航迹规划任务,得到的航迹规划结果简单平缓,总长更短。

AST

参考文献

- [1] 彭锦城, 彭侠夫, 张霄力, 等. 基于改进Hybrid A*的旋翼无人机路径规划算法[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 105-110.
Peng Jincheng, Peng Xiafu, Zhang Xiaoli, et al. Path planning method for rotorcraft unmanned aerial vehicles based on improved Hybrid A* algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 105-110. (in Chinese)
- [2] Raparelli E, Bajocco S. A bibliometric analysis on the use of unmanned aerial vehicles in agricultural and forestry studies[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(24): 9070-9083.

- [3] 吴坤, 池沛, 王英勋, 等. 基于混沌灰狼优化的多无人机协同航路规划[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 82-95.
Wu Kun, Chi Pei, Wang Yingxun, et al. Collaborative path planning of multiple unmanned aerial vehicles based on chaotic grey wolf optimization[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(10): 82-95. (in Chinese)
- [4] Khan M T R, Saad M M, Yang Ru, et al. Aspects of unmanned aerial vehicles path planning: Overview and applications[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34(10): e4827.
- [5] Tsai Y J, Lee C S, Lin Chunliang, et al. Development of flight path planning for multirotor aerial vehicles[J]. *Aerospace*, 2015, 2(2): 171-188.
- [6] Zhao Yijing, Zheng Zheng, Liu Yang. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018,158: 54-64.
- [7] Yang Fan, Fang Xi, Gao Fei, et al. Obstacle avoidance path planning for UAV based on improved RRT algorithm[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022,15: 1-9.
- [8] Huang Chenxi, Lan Yisha, Liu Yuchen, et al. A new dynamic path planning approach for unmanned aerial vehicles[J]. *Complexity*, 2018,15: 1-17.
- [9] Huang Chen, Zhou Xiangbing, Ran Xiaojuan, et al. Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023,121: 105942.
- [10] Shao Shikai, Peng Yu, He Chenglong, et al. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization[J]. *ISA Transactions*, 2020, 97: 415-430.
- [11] Aggarwal S, Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges[J]. *Computer Communications*, 2020,149: 270-299.
- [12] Luo Guanchen, Yu Jianqiao, Mei Yuesong, et al. UAV path planning in mixed-obstacle environment via artificial potential field method improved by additional control force[J]. *Asian Journal of Control*, 2015, 17(5): 1600-1610.
- [13] Ge S S, Cui Y J. New potential functions for mobile robot path planning[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000,16(5): 615-620.
- [14] Chen Yanli, Bai Guiqiang, Zhan Yin, et al. Path planning and obstacle avoiding of the USV based on improved ACO-APF hybrid algorithm with adaptive early-warning[J]. *IEEE Access*, 2021(9): 40728-40742.
- [15] Li Weihao, Yang Chenguang, Jiang Yiming, et al. Motion planning for omnidirectional wheeled mobile robot by potential field method[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017(3): 1-11.
- [16] Li Zhenhua, Yang Xiaojun, Sun Xiangdong, et al. Improved artificial potential field based lateral entry guidance for waypoints passage and no-fly zones avoidance[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019,86: 119-131.
- [17] Shin Yujin, Kim E. Hybrid path planning using positioning risk and artificial potential fields[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021,112: 106640.
- [18] Wang Honglun, Lyu Wentao, Yao Peng, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 229-239.
- [19] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1985.
- [20] Phung M D, Ha Q P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 107: 107376.
- [21] Han Bing, Qu Tengeng, Tong Xiaochong, et al. Grid-optimized UAV indoor path planning algorithms in a complex environment[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022,111: 102857.

UAV Path Planning Method Based on Plane-constrained Artificial Potential Field

Gao Xun^{1,2}, Zhang Lei³, Hu Gaoge^{1,2}, Yang Zijiang^{1,2}, Gao Bingbing^{1,2}

1. Northwest Polytechnical University, Xi'an 711072, China

2. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China

3. AVIC Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: Path planning is the key to realize autonomous navigation flight of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). This paper proposed an UAV path planning method based on plane-constrained artificial potential field in order to overcome the problems of planning failure and low practicality when applying the artificial potential field method to UAV path planning. Firstly, the use of the constraint plane to cut obstacles simplified the distribution of obstacles. Secondly, the feasibility constraints of flight path were constructed, and the artificial potential field based on the constraint plane was established. Finally, this paper synthesized and improved the extra control force method and commonly used improved potential field functions. Simulations have verified that the proposed method overcomes the problems that traditional artificial potential field method does not consider the physical performance limitations of UAVs, is easy to fall into local minima and unable to reach targets. At the same time, the path planning quality is improved. Through the research, the shortcomings of artificial potential field method have been improved, which is conducive to the application and development of artificial potential field method in the field of UAV path planning.

Key Words: unmanned aerial vehicle; path planning; artificial potential field method; obstacle avoidance path; extra control force method

Received: 2023-04-28; **Revised:** 2023-06-20; **Accepted:** 2023-07-11

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20200019053003,20181953021) ; Key Research and Development Program of Shaanxi (2023-YBGY-375) ; Shenzhen Science and Technology Program (JCYJ20210324121602008)