

控制与决策

Control and Decision

基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法

郭剑东, 王康, 李志宇

引用本文:

郭剑东, 王康, 李志宇. 基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 653–660.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0768>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

一种高匹配性的多层代价地图生成算法

A high matching layered costmap generation algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2883–2888 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0721>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计

Finite time control based on reinforcement learning for a small-size unmanned helicopter

控制与决策. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法

郭剑东^{1†}, 王康², 李志宇¹

(1. 南京航空航天大学 中小型无人机先进技术工信部重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为解决无人机飞行过程中障碍物规避问题, 提出一种新的三维自主避障算法. 首先, 根据障碍物的若干信息利用标准凸面体对不规则障碍物进行数学建模, 用一个或多个标准凸面体覆盖障碍物整体或关键部分; 然后, 根据障碍物模型设计圆弧规避航路算法, 将避障问题转化为跟踪规避航路控制问题, 并定义避障判定、避障方向判断和成功避障规则; 最后, 结合非线性制导律和高度通道控制, 实现无人机实时三维航路跟踪与自主避障. 非线性数值仿真结果表明, 避障算法能够有效地规避障碍物且三维航路跟踪精度好, 能够应用于无人机的避障飞行任务.

关键词: 无人机; 圆弧航路; 自主避障; 非线性制导律; 三维航路跟踪

中图分类号: V249

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0768

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 郭剑东, 王康, 李志宇. 基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 653-660.

Autonomous obstacle avoidance algorithm designed for UAV based on convex circular trajectory

GUO Jian-dong^{1†}, WANG Kang², LI Zhi-yu¹

(1. Key Laboratory of Advanced Technology for Small and Medium-Sized UAV, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new three-dimensional (3D) autonomous obstacle avoidance algorithm is proposed to solve the problem of obstacle avoidance during the flight of unmanned aerial vehicle(UAV). Firstly, the irregular obstacles are modeled by standard convex bodies according to some information of obstacles, and one or more standard convex bodies are used to cover the whole or key parts of the obstacle. Then, the arc obstacle avoidance trajectory strategy is designed according to the obstacle model, the obstacle avoidance problem is transformed into the avoidance trajectory tracking problem, and the rules of the decision and direction obstacle avoidance and the criterion of successful obstacle avoidance are defined. Finally, combined with the nonlinear guidance law and height channel control, UAV real-time three-dimensional trajectory tracking control and autonomous obstacle avoidance are realized. The nonlinear numerical simulation shows that the obstacle avoidance algorithm can effectively avoid obstacles and has high accuracy of 3D trajectory tracking, which can be applied to UAV obstacle avoidance missions.

Keywords: UAV; circular trajectory; autonomous obstacle avoidance; nonlinear guidance law; 3D trajectory tracking

0 引言

无人机因具有灵活轻便、机动性强、隐蔽性好等优点, 已经广泛应用于民用和军用领域^[1-2]. 随着无人机的不断发展, 无人机飞行环境也越来越复杂, 无人机的自主避障技术已逐渐成为关键技术之一^[3-4].

现有的无人机避障方法主要分为以下两类: 1) 基于航路规划的避障方法. 该类方法的主要思想是

将避障问题转化为航路规划问题. 随着该类方法的不断发展, 已出现了许多航路规划方法, 例如遗传算法^[5-6]、人工势场法^[7-8]、A*算法^[9-10]等. 文献[11]对这几种方法从收敛速度和航路最优性方面在不同障碍物分布场景下进行了比较, 对比结果表明: 遗传算法相对于细胞数量的增加对时间的敏感性较低; 人工势场法收敛速度较快, 但容易陷入局部最优, 且不

收稿日期: 2019-05-31; 修回日期: 2019-09-05.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(56XCA1816504).

责任编辑: 解学军.

[†]通讯作者. E-mail: bh4rbc@163.com.

能得到最优航路; A*算法通过牺牲收敛速度来提高航路最优性. 航路规划算法通常在收敛速度与航路最优性之间存在矛盾^[12]. 为解决这一矛盾, 部分学者提出了一些将多种方法结合的航路规划避障算法^[13-14]. 2) 基于几何关系的避障方法. 该类方法主要思想是根据无人机与障碍物之间的相对距离、速度、加速度、角度等关键信息计算得到规避航路. 文献^[15]采用椭球体对障碍物进行建模, 根据椭球体方程与无人机速度矢量计算得到障碍物规避航点, 无人机通过跟踪避障航点进行障碍物规避. 文献^[16]基于无人机与障碍物的距离和无人机飞行速度建立模糊规则, 通过模糊逻辑控制获得障碍物规避行为的偏航动作指令, 实现障碍物的规避, 但由于问题的复杂性, 该方法只能用于二维平面避障问题. 文献^[17]通过实时检测无人机与障碍物位置关系获取障碍物的特征点, 得到安全飞行边界, 无人机沿边界飞行以规避障碍物. 文献^[18]提出一种基于双旋Lyapunov矢量场的无人机避障策略, 该方法通过选定无人机速度旋转方向为最优避障方向来减少规避航路, 选定其反方向引导无人机规避障碍物, 但该方法较难应用于三维空间中的避障问题. 基于几何关系的避障方法实时性好, 但通常需要对障碍物进行建模, 较难应用于复杂环境^[19].

针对三维空间下障碍物的实时规避问题, 本文基于障碍物与无人机之间的几何关系, 提出一种新的三维自主避障算法. 该算法根据障碍物建模设计圆弧规避航路, 通过定义障碍物探测、规避方向判断和成功避障规则, 并结合非线性制导律^[20-21]与高度通道控制, 实现无人机实时三维自主避障与航路跟踪控制.

1 数学描述

1.1 障碍物建模

无人机飞行航路中常常存在一些障碍物, 例如建筑物、山峰、树木等, 这些障碍物大多不规则, 直接处理比较困难. 而传感器探测到的障碍物信息常常不够全面, 过分关注障碍物的细节问题, 将会极大增加避障算法的设计难度和计算量, 也降低了避障效果. 当机载感知探测传感器检测到障碍物信息时, 将传感器得到的若干采样点信息拟合为一个障碍圆用于覆盖障碍物整体或关键部分, 可以简化对障碍物的描述, 便于设计避障算法. 当障碍物尺寸较大时, 无人机在避障过程中持续感知探测障碍物信息, 用多个障碍圆组合表示障碍物, 如图1所示.

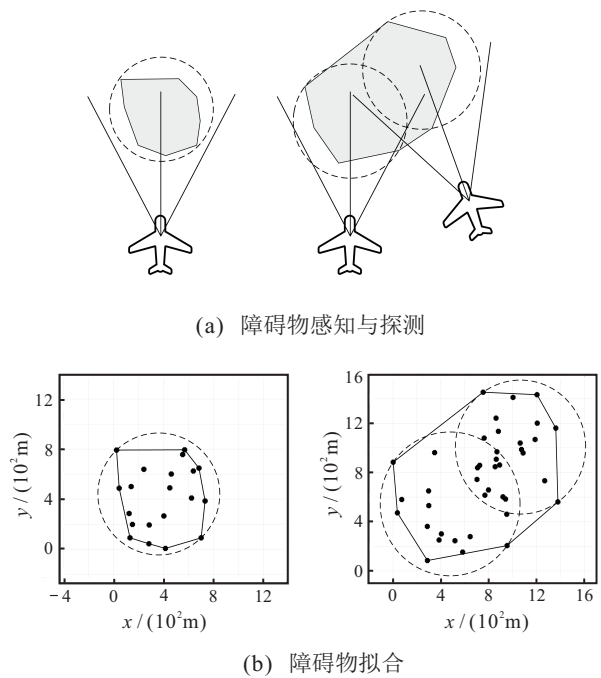


图1 障碍物感知探测与拟合

通过障碍物的感知探测与拟合, 在三维空间中用标准凸面体对障碍物进行建模, 如半球、圆柱、圆锥、圆台等, 它们的近似表达式^[22]可统一为

$$\Gamma = \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{2p} + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^{2q} + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^{2r}. \quad (1)$$

其中: (x, y, z) 为障碍物模型上任意一点, (x_0, y_0, z_0) 为障碍物模型的中心坐标, 参数 a, b, c 和 p, q, r 决定障碍物模型的形状和大小.

图2为不同参数组合得到的各类典型凸面体, $\Gamma < 1$ 、 $\Gamma > 1$ 和 $\Gamma = 1$ 分别表示在障碍物模型内、外和表面.

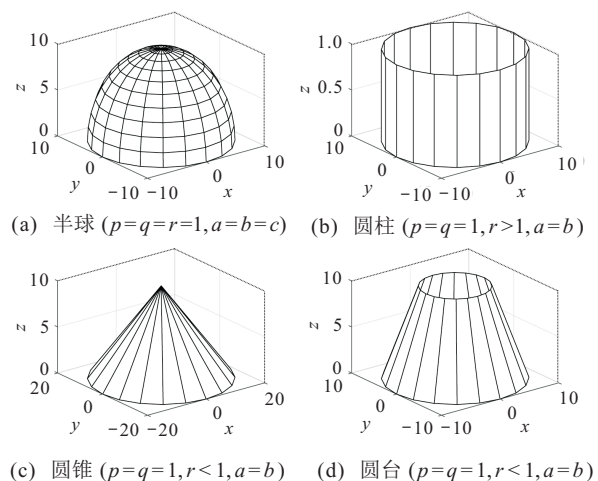


图2 典型凸面体障碍物模型

通过对障碍物建模, 可以将无人机飞行航路中的简单障碍物用单个凸面体表示; 针对复杂障碍物, 可以用多个凸面体组合表示, 如图3所示. 这样, 不仅简化了对障碍物的描述, 也提高了障碍物规避准确

性. 通过该建模方法可以将规避航路设计为圆弧航路, 于是避障问题便转化为跟踪圆弧规避航路问题.

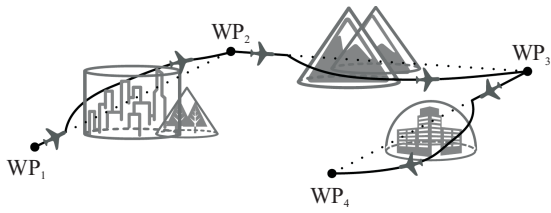


图3 无人机三维自主避障示意

1.2 问题描述

本文将障碍物的表面与内部均视为禁飞区或威胁区, 则规避航路需在障碍物外部, 即 $\Gamma > 1$. 无人机的自主避障问题可以描述为无人机在跟踪目标航点的过程中始终在禁飞区或威胁区之外. 当无人机跟踪目标航路飞行过程中发现存在障碍物威胁时, 实时生成规避航路, 无人机跟踪规避航路以实现障碍物规避. 自主避障飞行航路可以表示为

$$P = P_{\text{target}} + \bigcup_{i=1}^n P_{\text{avoid}}^i, P_{\text{avoid}}^i = \{\Gamma > 1\}. \quad (2)$$

其中: P_{target} 为目标航路, P_{avoid}^i 为第 i 个障碍物的规避航路, n 为障碍物个数.

2 避障策略

2.1 障碍物探测

根据无人机的飞行性能和障碍物大小设计一个合适的虚拟“前视探测线 L_{det} ”, 用于判断无人机是否与障碍物相交. 如图4左图所示, 当无人机以最小转弯半径规避障碍物时, 前视探测线最短, 由勾股定理可得最短探测线 $L_{\text{det}, \text{min}}$ 长度为

$$L_{\text{det}, \text{min}} = \sqrt{R_{\text{obs}} \sqrt{R_{\text{obs}} + 2R_{\text{min}}} - R_{\text{obs}}}. \quad (3)$$

其中: R_{obs} 为无人机当前高度下对应障碍物圆的半径; R_{min} 为无人机最小转弯半径, 其表达式为

$$R_{\text{min}} = \frac{V_n^2}{g \tan(\phi_{\text{max}})}. \quad (4)$$

这里: V_n 为无人机飞行速度, ϕ_{max} 为无人机最大滚转角.

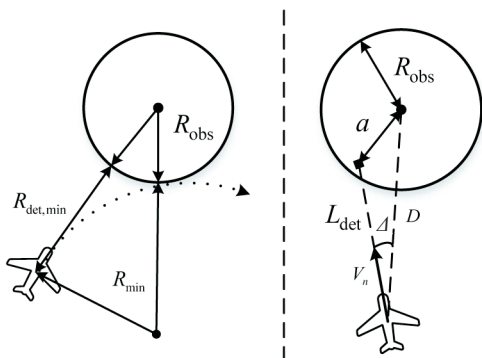


图4 障碍物探测示意

无人机从开始转弯到达最大滚转角需要一定时间, 因此需增加时延补偿. 无人机的飞行速度 V_n 与时间 τ_{roll} 的乘积即为时延段无人机的飞行距离, 则前视探测线为

$$L_{\text{det}} = L_{\text{det}, \text{min}} + V_n \tau_{\text{roll}}. \quad (5)$$

当无人机到障碍物圆的圆心距离 D 满足条件 $D \leq L_{\text{det}} + R_{\text{obs}}$ 时, 开始进行障碍物检测. 如图4右图所示, a 为圆心到探测线末端的距离, 当 $a = R_{\text{obs}}$ 时, 探测线终点刚好位于障碍物的边缘上; 当 $a < R_{\text{obs}}$ 时, 探测线触及到障碍物, 无人机需进行规避飞行.

2.2 规避方向判断

根据无人机的实时位置、飞行方向以及障碍物圆心位置3个参数实时判断规避方向. 当无人机飞行方向指向无人机重心与障碍物圆心连线的左侧时, 无人机将沿障碍物左侧实施规避飞行; 反之, 沿障碍物右侧规避飞行, 如图5所示.

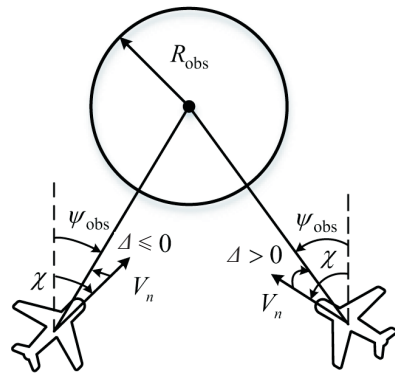


图5 障碍物规避方向判断示意

通过计算无人机重心与障碍物圆心的连线与无人机速度方向的夹角 Δ 大小来确定障碍物规避方向, 夹角 Δ 的表达式为

$$\Delta = \psi_{\text{obs}} - \chi, \Delta \in [-\pi, \pi]. \quad (6)$$

其中: ψ_{obs} 为无人机中心与障碍物圆心的连线与正北方向的夹角, χ 为航迹角. 当 $\Delta > 0$ 时, 无人机沿障碍物左侧飞行; 当 $\Delta \leq 0$ 时, 无人机沿障碍物右侧飞行.

2.3 障碍物规避

如图6所示, 当无人机在 T_1 处探测到有障碍物威胁时, 生成半径为 R_{avd} 的圆形规避航路, 半径 R_{avd} 的表达式为

$$R_{\text{avd}} = R_{\text{obs}} + L_{\text{safe}}, \quad (7)$$

其中 L_{safe} 为安全飞行距离. 随着无人机高度的变化, R_{obs} 也不断变化, 所以 R_{avd} 不断变化, 可以通过无人机与障碍物模型的几何关系计算规避飞行的实时半

径. 无人机通过跟踪变半径圆形规避航路实现障碍物规避.

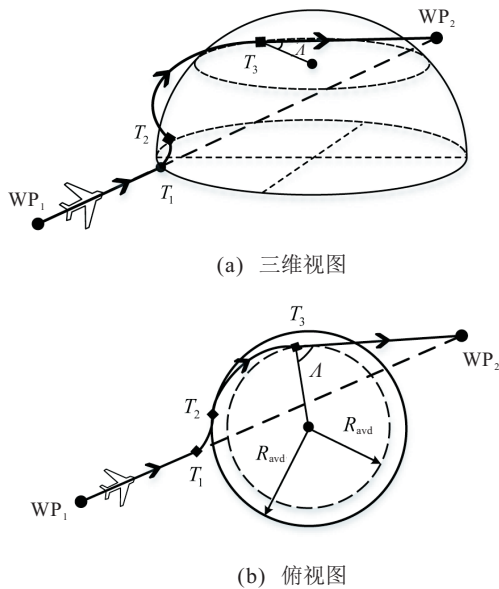


图6 障碍物规避方向判断示意

在规避飞行过程中,无人机不断检测期望航点是否可达. 如果期望航点不在障碍物内,则表示期望航点视线可达;否则,切换至期望航点的下一航点.

当无人机与可达航点之间的连线和无人机与当前高度下障碍物圆心的连线的夹角 $A \geq 0$ 时,无人机退出规避飞行,以直线飞行至可达航点.

无人机自主避障流程如图7所示.

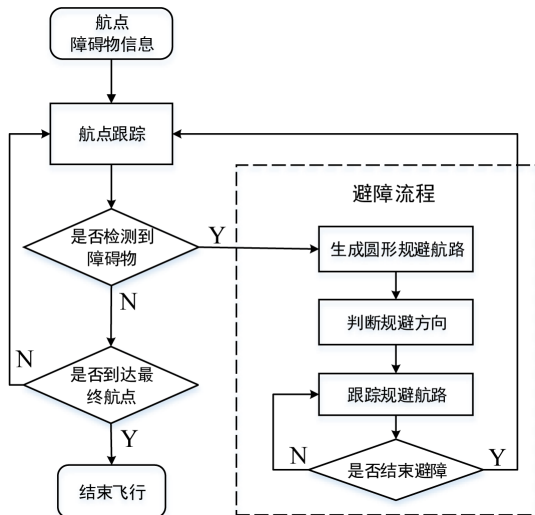


图7 无人机自主避障流程

3 导航控制律

本文将无人机三维航路跟踪问题分解为水平航路跟踪和高度跟踪:由水平航路跟踪控制律可以得到滚转角控制信号,由高度跟踪控制律可以得到高度控制信号,导航控制系统结构框图如图8所示. 其中:高度控制器采用PID控制;姿态控制器采用自抗扰控

制,该部分不是本文重点研究内容,在此不作详述.

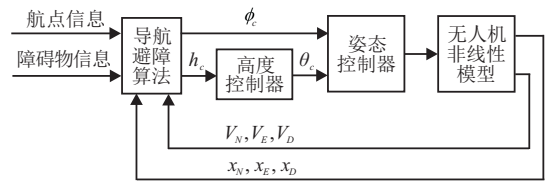


图8 无人机导航控制结构框图

3.1 水平航路跟踪控制律

无人机直线航路跟踪采用非线性制导律方法,如图9左图所示. 目标航路为航点 WP_1 至 WP_2 ,无人机在目标航路上选择参考点 P ,使其与无人机的直线距离为 L_1 ,经计算可得无人机到达参考点的侧向加速度 a_L 表达式为

$$a_L = \frac{2V_n^2}{L_1} \sin \eta, \quad (8)$$

其中 η 为无人机飞行速度方向与无人机到参考点连线方向的夹角.

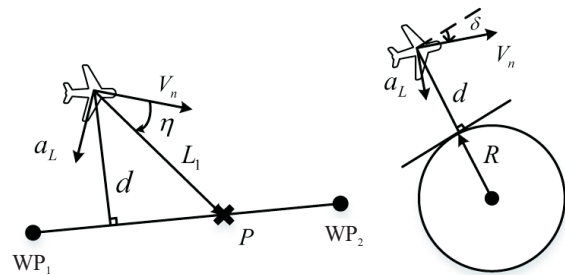


图9 航路跟踪示意

为解决航点切换时不光滑的问题,本文设计了圆弧切换策略,解决了非线性制导律在航点切换时的超调问题,且降低了航点切换时侧偏距误差.

如图10所示,目标航路由航点 WP_1 、 WP_2 、 WP_3 组成,目标航路之间的夹角 β 的表达式为

$$\beta = \arccos \left(\frac{\vec{q}_1 \cdot \vec{q}_2}{|\vec{q}_1| |\vec{q}_2|} \right), \quad (9)$$

其中 \vec{q}_1 、 \vec{q}_2 分别为航点 WP_2 到航点 WP_1 、 WP_3 的向量. 无人机按目标航路飞行,当飞行至 A 点时,无人机以最小转弯半径进行圆弧转弯;当圆弧转弯飞行至 B 点时,无人机结束圆弧飞行,继续跟踪目标航路.

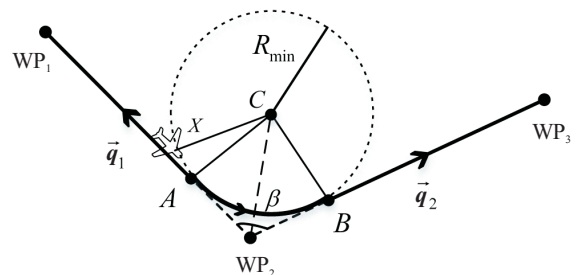


图10 航点切换示意

无人机进入圆弧转弯飞行的判断条件是 $\overrightarrow{CX} \times \overrightarrow{CA}$ 变号. 其中: X 为无人机位置, C 为圆弧圆心. 圆心点在目标航路夹角的平分线上, 到航点 WP_1 的距离为 $R_{\min}/\sin(\beta/2)$; A 为航点 WP_1 、 WP_2 航路上一点, 到航点 WP_2 的距离为 $R_{\min}/\tan(\beta/2)$.

无人机结束圆弧转弯飞行的判断条件是 $\overrightarrow{CX} \times \overrightarrow{CB}$ 变号. B 为航点 WP_2 、 WP_3 航路上一点, 到航点 WP_2 的距离为 $R_{\min}/\tan(\beta/2)$.

无人机圆弧航路跟踪控制律采用向心力与侧偏距 PD 控制相结合的方法, 如图 9 右图所示, 其侧向加速度的表达式为

$$a_L = k_p d + k_d \dot{d} + \frac{V_n^2}{R+d} \quad (10)$$

其中: k_p 、 k_d 分别为比例、微分系数, d 为侧偏距, R 为圆弧航路的半径.

当夹角 η 和夹角 δ 很小且假设没有内环动力学的条件下^[23-24], 式(8)和(10)可以分别近似为

$$\begin{cases} \frac{2V_n^2}{L_1} \sin \eta \simeq \frac{2V_n}{L_1} \left(\dot{d} + \frac{V_n}{L_1} \right) \simeq -\ddot{d}, \\ k_p d + k_d \dot{d} + \frac{V_n^2}{R+d} \simeq \frac{V_n^2}{R+d} - \ddot{d}. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 水平跟踪控制律可以近似为一个标准的二阶系统. 航线跟踪时系统的阻尼比为 0.707, 自然频率取决于无人机飞行速度 V_n 与直线距离 L_1 的比值; 圆弧跟踪时系统阻尼比和自然频率取决于比例、微分系数 k_p 和 k_d .

根据无人机的受力分析, 可得滚转角控制信号为

$$\phi_c = \arctan(a_L/g). \quad (12)$$

3.2 高度跟踪控制律

航点 WP_1 、 WP_2 为目标航路上两个航点, 高度分别为 h_1 、 h_2 , 如图 11 所示, 则高度控制信号为

$$h_c = h_1 + d_1 \cos \lambda \tan \gamma. \quad (13)$$

其中: γ 为航迹倾斜角, d_1 为水平投影下无人机到航点 WP_1 的距离, λ 为水平投影下无人机和航点 WP_1 的连线与目标航路投影的夹角.

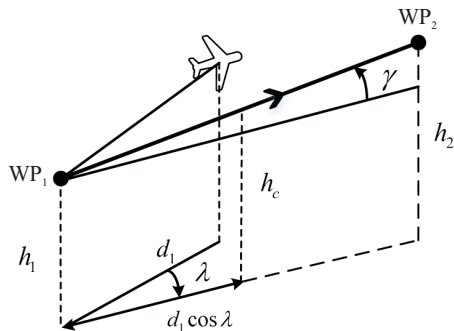


图 11 高度跟踪示意

4 数值仿真实验

本文以 Cessna172 固定翼无人机的全量非线性飞行动力学模型为基础开展数值仿真实验. 仿真实验中无人机飞行性能如下: 最大滚转角 $\phi_{\max} = \pm 30^\circ$, 最大俯仰角 $\theta_{\max} = \pm 20^\circ$, 滚转角、俯仰角响应为 1.0 s, 偏航角响应为 2.6 s, 高度响应为 5.2 s. 设无人机初始位置为 (0, 0, 200) m, 巡航速度 $V_n = 40$ m/s, 初始速度方向为正北.

4.1 实验 1

实验 1 为无人机三维航路跟踪验证, 航点坐标如表 1 所示.

表 1 实验 1 航点坐标

航点	坐标 / km
WP ₁	(0, 0, 0.2)
WP ₂	(0, 3, 0.4)
WP ₃	(1, 3, 0.4)
WP ₄	(3, 4, 0.4)
WP ₅	(4, 3, 0.4)
WP ₆	(8, 3, 0.4)
WP ₇	(9, 2, 0.4)
WP ₈	(7, 0.5, 0.3)
WP ₉	(5, -1, 0.2)

图 12 给出了三维航路跟踪控制飞行仿真曲线. 由图 12(a) 和图 12(b) 可以看出, 无人机能够精确地跟踪上期望的航路轨迹. 由图 12(c) 可以看出, 无人机在直线跟踪时, 滚转角信号几乎为 0; 由于航点 WP_8 与航点 WP_7 、 WP_9 位于同一直线上, 无人机不需要转弯动作. 由图 12(d) 可以看出, 无人机三维航路跟踪误差较小, 无人机在直线段航路跟踪误差几乎为 0, 在航点切换时, 误差控制在 ± 10 m 以内, 圆弧航路段跟踪误差控制在 ± 2.5 m 以内; 高度稳定跟踪误差控制在 ± 5 m 以内.

4.2 实验 2

实验 2 为无人机三维自主避障验证, 航点坐标如表 2 所示, 安全飞行距离 $L_{\text{safe}} = 100$ m.

表 2 实验 2 航点坐标

航点	坐标 / km
WP ₁	(0, 0, 0.2)
WP ₂	(-0.6, 4, 0.4)
WP ₃	(0, 5, 0.4)
WP ₄	(0.5, 4, 0.4)
WP ₅	(0.3, 0.5, 0.2)

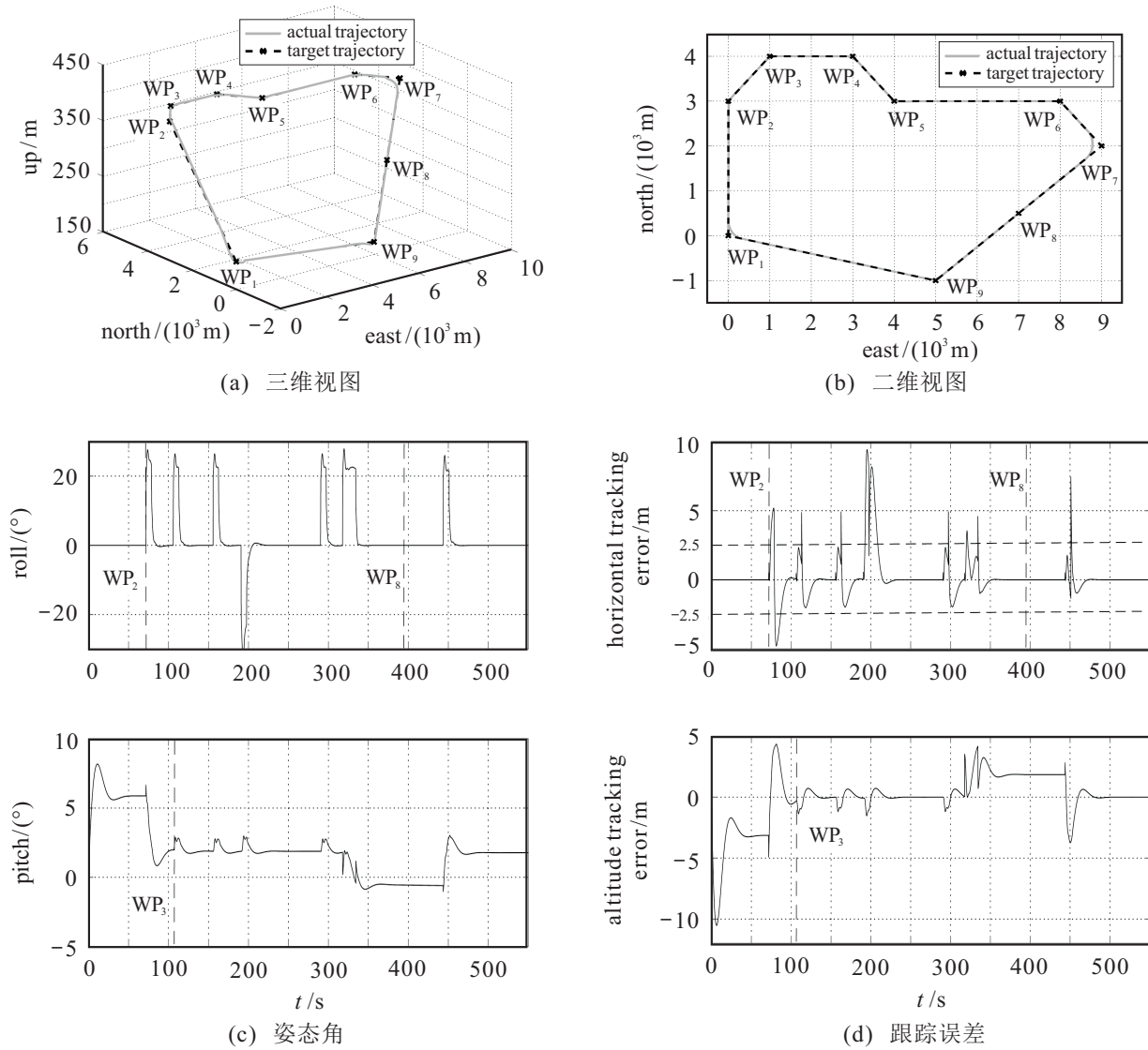


图 12 三维航路跟踪控制飞行仿真曲线

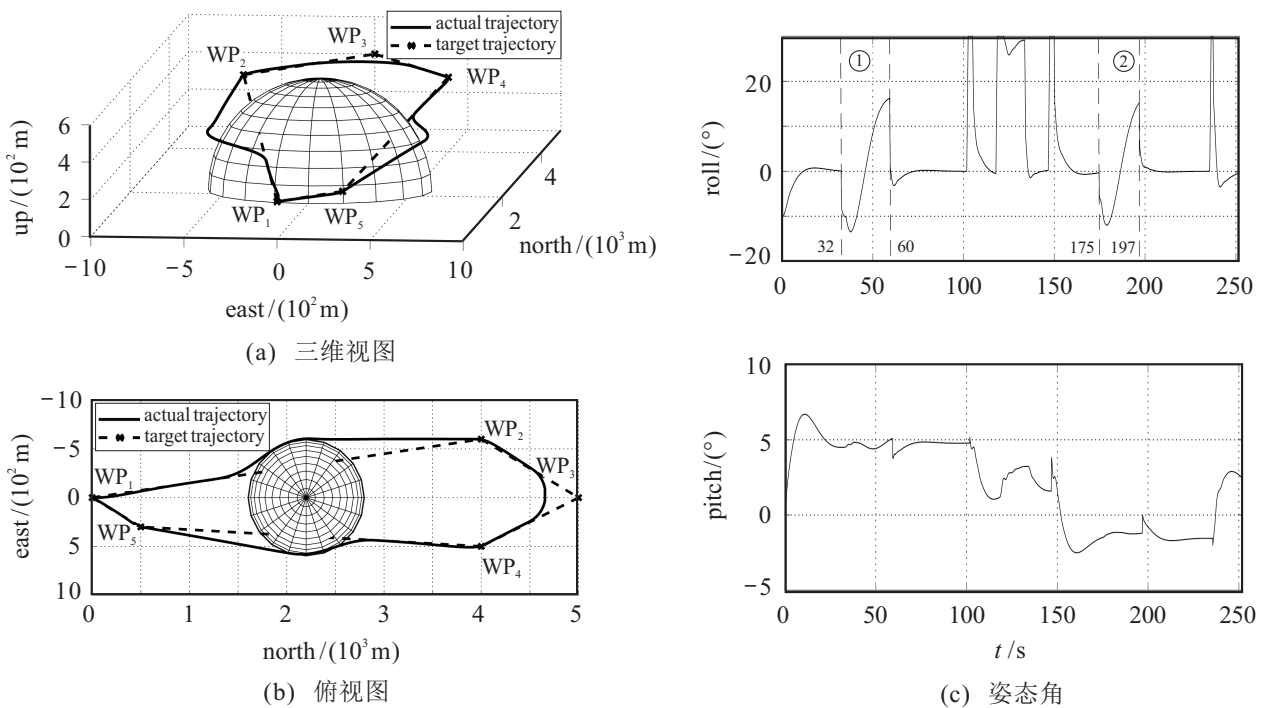
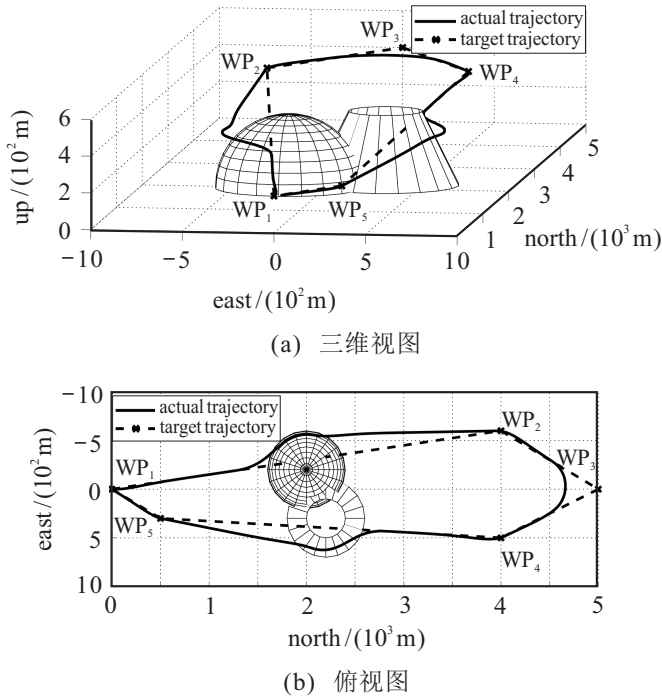


图 13 障碍物规避飞行仿真曲线

如图13所示,无人机首先沿期望航路飞行,在32s时检测到有障碍物威胁,无人机进行圆弧规避动作;在60s时检测到规避完成,无人机沿直线飞向期望航点,继续跟踪期望航路;在175~197s之间,无人机再次检测到障碍物威胁,进行第2次障碍物规避.从仿真结果可以看出,无人机能够对障碍物进行有效规避.



4.3 实验3

实验3为复杂障碍物规避验证.当障碍物比较复杂时,可以利用多个标准凸面体进行数学建模.航点坐标与实验2相同,安全飞行距离 $L_{safe} = 100\text{ m}$.

如图14所示:在32~55s之间,无人机规避障碍物1;在178~197s之间,无人机规避障碍物2.从仿真结果可以看出,无人机能够有效地规避复杂障碍物.

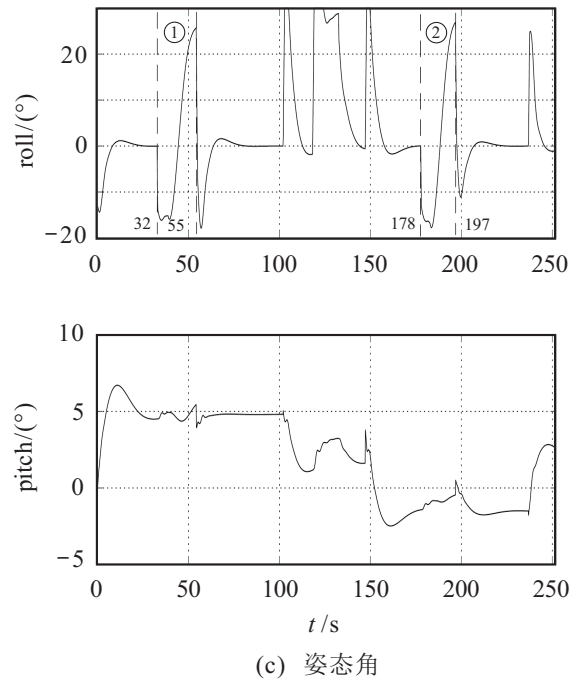


图14 复杂障碍物规避飞行仿真曲线

5 结论

本文针对无人机飞行航路中的障碍物规避难题提出了一种新的自主避障算法.利用凸面体对障碍物的安全边界进行数学描述,将一个或多个混合的凸面体对复杂障碍物进行建模从而获得避障圆弧航路,将障碍物规避问题转化为跟踪避障圆弧航路问题,简化了避障算法的设计;利用非线性侧向制导律与高度控制相结合,完成无人机三维避障航路的跟踪控制.研究表明,本文提出的自主避障算法是有效且可行的,三维避障航路跟踪控制精度高,在直线段航迹误差小于1.0m,圆弧段航迹误差小于2.5m,高度误差小于5.0m.

参考文献(References)

[1] Kang Y L, Xi Y. Development situation, trend and countermeasure of consumer-level UAV market in China[C]. International Conference on Information Science and Technology. Da Nang: IEEE, 2017: 2271-2097.

[2] Gardener R. UAV technology spreading into multiple domains[J]. Asia-Pacific Defence Reporter, 2017, 43(1): 66-72.

[3] He R K, Wei R X, Zhang Q R. UAV autonomous collision avoidance approach[J]. Automatika, 2017, 58(2): 195-204.

[4] Tony L A, Ghose D, Chakravarthy A. Avoidance maps: A new concept in UAV collision avoidance[C]. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Miami: IEEE, 2017: 1483-1492.

[5] Elhoseny M, Tharwat A, Hassanien A E. Bezier curve based path planning in a dynamic field using modified genetic algorithm[J]. Journal of Computational Science, 2018, 25: 339-350.

[6] Ramirez-Atencia C, Bello-Organ G, R-Moreno M D, et al. Solving complex multi-UAV mission planning problems using multi-objective genetic algorithms[J]. Soft Computing, 2017, 21(17): 4883-4900.

[7] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 基于改进人工势场的无人机编队避障控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2018,

- 52(11): 112-119.
(Zhang J L, Yan J G, Zhang P, et al. Study on the collision avoidance of UAV cooperative formation with improved artificial potential field[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 112-119.)
- [8] 张菁, 何友, 彭应宁, 等. 基于神经网络和人工势场的协同博弈路径规划[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 228-238.
(Zhang J, He Y, Peng Y N, et al. Neural network and artificial potential field based cooperative and adversarially path planning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 228-238.)
- [9] Song X Q, Hu S Q. 2D path planning with dubins-path-based A* algorithm for a fixed-wing UAV[C]. The 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering. Beijing: IEEE, 2017: 69-73.
- [10] 陈志旺, 夏顺, 李建雄, 等. 基于定向A*算法的多无人机同时集结分步策略[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1169-1177.
(Chen Z W, Xia S, Li J X, et al. Serial strategy for rendezvous of multiple UAVS based on directional A* algorithm[J]. Control and Decision, 2019, 34(6): 1169-1177.)
- [11] Radmanesh M, Kumar M, Guentert P H, et al. Overview of path-planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: A comparative study[J]. Unmanned Systems, 2018, 6(2): 95-118.
- [12] Agarwal D, Bharti P S. A review on comparative analysis of path planning and collision avoidance algorithms[J]. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2018, 12(6): 608-624.
- [13] 姚鹏, 王宏伦. 基于改进流体扰动算法与灰狼优化的无人机三维航路规划[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 701-708.
(Yao P, Wang H L. Three-dimensional path planning for UAV based on improved interfered fluid dynamical system and grey wolf optimizer[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 701-708.)
- [14] Yao P, Wang H L, Su Z K. Hybrid UAV path planning based on interfered fluid dynamical system and improved RRT[C]. The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Yokohama: IEEE, 2015: 829-834.
- [15] Sasongko R A, Rawikara S S, Tampubolon H J. UAV obstacle avoidance algorithm based on ellipsoid geometry[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 88(2/3/4): 567-581.
- [16] Zheng J A, Liu B, Meng Z J, et al. Integrated real time obstacle avoidance algorithm based on fuzzy logic and L_1 control algorithm for unmanned helicopter[C]. 2018 Chinese Control and Decision Conference. Shenyang: IEEE Press, 2018: 1865-1870.
- [17] Alkaff A, Garcia F, Martin D, et al. Obstacle detection and avoidance system based on monocular camera and size expansion algorithm for UAVs[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1061-1082.
- [18] 张毅, 孟启源, 杨秀霞. 基于双旋Lyapunov矢量场的无人机避障算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(8): 1514-1522.
(Zhang Y, Meng Q Y, Yang X X. Obstacle avoidance algorithm for UAV based on bi-rotation Lyapunov vector fields[J]. Control and Decision, 2018, 33(8): 1514-1522.)
- [19] Ha L N N T, Bui D H P, Hong S K. Nonlinear control for autonomous trajectory tracking while considering collision avoidance of UAVs based on geometric relations[J]. Energies, 2019, 12(8): 1551-1570.
- [20] Park S, Deyst J, How J P. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking[C]. AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Providence: AIAA, 2004: 4900-4915.
- [21] Curry R, Lizarraga M, Mairs B, et al. L_2 , an improved line of sight guidance law for UAVs[C]. 2013 American Control Conference. Washington DC: IEEE, 2013: 1-6.
- [22] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [23] Park S, Deyst J, How J P. Performance and Lyapunov stability of a nonlinear path following guidance method[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2007, 30(6): 1718-1728.
- [24] 陈子昂, 杏建军, 郑黎明, 等. 无人机导航路径跟踪精确制导仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 26-30.
(Chen Z A, Xing J J, Zheng L M, et al. Simulation research on guidance logic for unmanned air vehicles path following[J]. Computer Simulation, 2017, 34(10): 26-30.)

作者简介

郭剑东(1983—), 男, 副研究员, 博士, 从事无人飞行器建模与飞行控制、嵌入式飞控系统开发、无人机自主避障算法等研究, E-mail: bh4rbc@163.com;

王康(1995—), 男, 硕士生, 从事无人机导航与避障的研究, E-mail: wangkanget@163.com;

李志宇(1976—), 男, 研究员, 从事无人机导航制导与控制等研究, E-mail: skyfly@nuaa.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)