

无人机规避或跟踪空中目标的自适应运动导引方法*

牛轶峰, 凌黎华

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 无人机规避或跟踪空中目标可以看作是一个非线性运动导引控制问题。针对这类任务中无人机和目标存在高机动性、高时敏性等特点, 提出了一种基于 Lyapunov 稳定性理论的无人机规避或跟踪目标运动导引方法。构建了基于精细时间运动导引方法的无人机规避或跟踪空中目标问题求解框架, 并将无人机碰撞规避和机动目标跟踪问题分别转化为到达虚拟目标点和与虚拟目标点交会的问题。针对碰撞规避问题, 将其转化为实现平行导引的控制问题, 基于 Lyapunov 稳定性理论设计了无人机碰撞规避导引律。针对机动目标跟踪问题, 在碰撞规避基础上, 根据目标点交会的要求设计了相应的目标跟踪导引律。在 Gazebo 平台上开展了仿真验证实验, 实验结果表明: 所提方法能够有效避免大过载情况的出现, 并具有较强的时变和参数适应性。

关键词: 无人机; 运动导引; 碰撞规避; 目标跟踪; 导引律

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)04-116-09

Adaptive motion guidance method of avoiding or tracking aerial targets for unmanned aerial vehicles

NIU Yifeng, LING Lihua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Avoiding or tracking aerial targets for UAVs (unmanned aerial vehicles) can be regarded as a nonlinear motion guidance and control problem. In such kind of tasks, both of UAVs and targets have high maneuverability and time sensitivity. According to these characteristics, a motion guidance method in fine time based on Lyapunov stability theory was proposed. A framework for solving the two problems was constructed, then collision avoidance and maneuvering target tracking problem were transformed into reaching virtual target and rendezvous problem respectively. The problem of collision avoidance of UAVs was converted into the control problem of realizing parallel navigation, and then the guidance law was designed using the Lyapunov stability theory. For the problem of tracking maneuvering target, the guidance law was designed according the requirement of rendezvous based on former guidance law. The simulated experiments in a Gazebo platform were conducted, and results showed that the proposed method can effectively avoid larger maneuver overload for UAVs, thus having better adaptability for time-varying and parameters.

Key words: unmanned aerial vehicle; motion guidance; collision avoidance; target tracking; guidance law

无人机系统的广泛应用对无人机系统的自主能力提出了越来越高的要求^[1]。感知与规避 (Sense And Avoid, SAA) 是无人机系统自主能力的重要组成部分, 也是无人机集成到现有有人机融合空域的一个必备能力, 需要无人机能够实时检测空中障碍, 并采取有效规避行为, 提高飞行安全性^[2]。对于空中突然出现的威胁、不明飞行物目标, 无人机可以做到提前发现并跟踪, 进行预警或驱离。这同样要求无人机具备有效跟踪并规避目标的能力。

针对这一问题, 本文分析了国内外研究现状,

提出了基于导引律方式的无人机运动导引方法, 构建了无人机跟踪或规避空中目标的问题求解框架, 基于 Lyapunov 稳定性理论分别针对无人机碰撞规避和目标跟踪设计了相应的导引律。

1 无人机运动导引方法

无人机碰撞规避和机动目标跟踪是一个时敏性高、非线性强的导引控制问题, 其导引控制问题比传统的线性系统复杂。传统的基于粗粒度时间或空间导航点的航线导引方式或低频率指令导引方式, 已经无法满足要求, 需要研究实时性更强、

* 收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61403410)

作者简介: 牛轶峰 (1979—), 男, 河南伊川人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: niuyifeng@nudt.edu.cn

鲁棒性更高的运动导引及控制方法。基于实时探测的目标或障碍运动状态信息,可产生更精细时间的运动导引,满足无人机跟踪或规避过程中的运动要求。

针对飞行器的导引与控制问题,目前主要有李雅普诺夫向量场法、比例导引法、线性反馈法和反步法等。①李雅普诺夫向量场方法是一种常用的无人机导引方法。文献[3]利用李雅普诺夫稳定性理论构建向量场,根据向量场产生的环形吸引子可进行路径跟踪。文献[4]根据李雅普诺夫向量场设计了多无人机协同保距跟踪的控制律。文献[5]将切线向量场和李雅普诺夫向量场结合,解决了多无人机协同观测最优观测构型的生成问题。②比例导引也被广泛用于各种交会过程。文献[6]基于比例导引法设计了无人机高机动轨迹跟踪导引律,并使用动态逆方法设计了控制律。文献[7]给出了一种三维路径生成的方法以及基于比例导引的无人机路径跟踪导引律。③线性反馈技术也被用于非线性系统的导引问题。文献[8]通过线性反馈技术对无人机追逃问题的导引方法进行设计,通过反馈的视线和视线角速率信息设计导引律,使俯仰和偏航方向的视线速率为零点。④反步法是另一种非线性控制技术^[9-10]。通过解李雅普诺夫方程设计控制器,从期望的虚拟控制输入出发反推得到真实的控制输入。跟线性反馈技术相比较,反步法具有更高的灵活性且设计的闭环控制系统可以是非线性的。文献[11]将反步法运用于小型无人机在二维平面上的非线性轨迹跟踪问题。文献[12]将导引律与高增益反步法和结构变量方法相结合并应用于导弹-目标在二维平面的交会问题。

从无人机飞行控制的实现方式上,又可以分为两种:一种是“轨迹规划/轨迹跟踪+指令跟踪和稳定控制”;另一种是“导引律+指令跟踪和稳定控制”,如图1所示。前者主要解决既考虑任务时效性要求,又考虑路径代价的运动导引控制问题,如目标变化和恶劣气象等;后者主要解决需要考虑外部状态反馈的任务,如避障、会合、空中目标跟踪、着陆等^[13]。同时,基于导引律方式的无人机精细时间运动导引方法,具备计算复杂度低、实时性好等特点,能够很好地满足无人机跟踪或规避的任务需求。

当制导的对象是导弹时,制导的目的是拦截或摧毁目标;当制导的对象是无人机时,其目的往往是使无人机到达预定的虚拟空间点(如航路点、会合点)。基于当前状态的闭环任务过程如

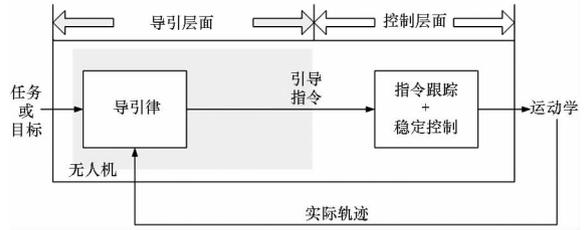


图1 导引律运动导引方式

Fig.1 UAV Motion guidance by guidance law

图2所示,制导过程中,主要根据实时获得的目标点状态信息设计导引律,控制无人机的运动状态,以实现无人机对空中机动目标跟踪或碰撞规避。

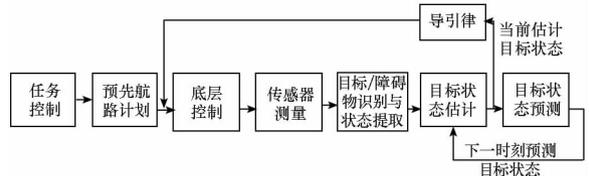


图2 基于当前时刻状态无人机跟踪或规避闭环任务过程

Fig.2 Closed loop task process of tracking or avoiding air object based on the current state

针对这一问题,文献[14]提出了一种使用比例导引的碰撞规避方法,但过载较大,且证明过程复杂。文献[15]结合李雅普诺夫稳定性理论,给出了一种广义的无人机制导律,但未给出碰撞规避导引律的设计。本文将从导引律设计范式出发,结合文献[14]的碰撞规避几何构型,给出无人机碰撞规避导引律,以及机动目标跟踪导引律的设计方法。这种方法具有参数自适应的功能,能够在距离较远,即视线变化较小情况下,提前做出机动,减小了在距离较近,视线变化率大时的大过载。

2 碰撞规避导引律设计

本节首先将碰撞规避问题转化为到达虚拟目标点的问题,更进一步将问题转化为实现平行导引的控制问题,使用Lyapunov稳定性理论设计了无人机碰撞规避导引律。

2.1 碰撞规避几何关系分析

无人机进行碰撞规避,可选择入侵飞行器安全区域外的点作为虚拟目标点,无人机到目标点的视线向量作为碰撞规避向量。根据平行导引法的基本原理,无人机进行机动,使碰撞规避向量的变化率为零,无人机便会到达目标点从而实现避碰。双机碰撞规避几何关系如图3^[14]所示。从图3中可以看出,将 \vec{XB} 作为碰撞规避向量,切点 B 作为虚拟目标点,根据平行导引原理,如果使碰撞

规避向量 \vec{XB} 的变化率为 0, 那么无人机将到达入侵飞行器安全圆上的 B 点, 从而解除碰撞威胁。显然, 碰撞规避过程中, 目标点是一个动态的点, 但当碰撞规避向量变化率为 0 时, 目标点也将固定。

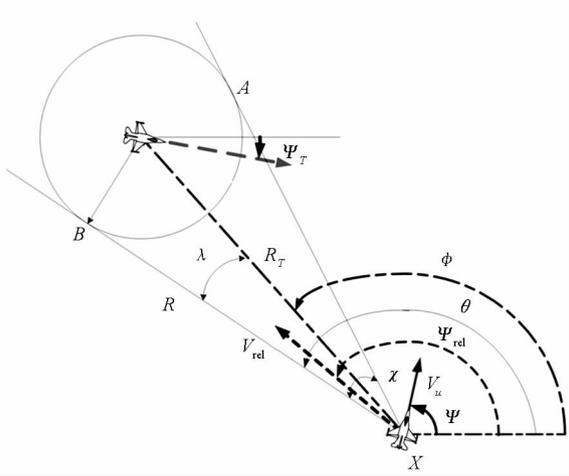


图 3 无人机碰撞规避几何关系图

Fig. 3 Geometry of UAV collision avoidance

2.2 导引律设计

导引律设计几何关系如图 4 所示^[14], 其中, a 为加速度, 方向垂直于相对速度 v_{rel} , 通过图中几何关系得:

$$\ddot{x} = -a \cos(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{x}{R} = \sin(\theta - \theta_0) \\ R = \sqrt{R_T^2 - R_p^2} \end{cases} \quad (2)$$

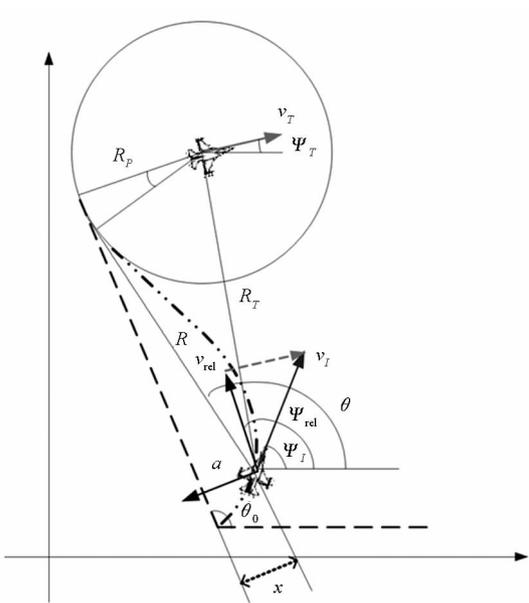


图 4 导引律设计几何关系图

Fig. 4 Geometry for designing guidance law

根据平行导引的原则, 只要 $\theta - \theta_0$ 不变化, 即

目标无人机碰撞规避向量变化率为 0, 则无人机能沿着碰撞规避向量飞行并到达安全圆的切点处, 与目标保持足够的距离从而保证自身的飞行安全。

下面进行制导律设计。合理的假设是: 当无人机与目标的距离足够远时, 可认为 $\theta - \theta_0$ 很小, 于是对式(1)和式(2)进行线性化, 得:

$$\dot{x} = -a \quad (3)$$

$$\theta - \theta_0 = \frac{x}{R} \quad (4)$$

令 $\kappa = \theta - \theta_0$, 代入式(4), 得:

$$\kappa = \frac{x}{R} \quad (5)$$

κ 对时间 t 的二阶导数为:

$$\ddot{\kappa}(t) = \frac{\ddot{x}(t)R(t) - \dot{x}(t)\dot{R}(t)}{R^2(t)} - \frac{\dot{\kappa}(t)\dot{R}(t) + \kappa(t)\ddot{R}(t)R(t) - x(t)\dot{R}(t) - \kappa(t)\dot{R}^2(t)}{R^2(t)} \quad (6)$$

引入参数

$$\begin{cases} a_1(t) = \frac{\ddot{R}(t)}{R(t)} \\ a_2(t) = \frac{2\dot{R}(t)}{R(t)} \\ b(t) = \frac{1}{R(t)} \end{cases} \quad (7)$$

代入式(6), 转化为:

$$\ddot{\kappa}(t) = -a_1(t)\kappa(t) - a_2(t)\dot{\kappa}(t) - b(t)a \quad (8)$$

令 $x_1 = \kappa(t)$, $x_2 = \dot{\kappa}(t)$, 则可建立系统状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_1(t)x_1 - a_2(t)x_2 - b(t)a \end{cases} \quad (9)$$

无人机碰撞规避过程中实现平行导引要求碰撞规避目标向量变化率为 0, 即 $\theta - \theta_0$ 变化率为 0, 即要求系统相对于 x_2 是渐进稳定的。下面使用 Lyapunov 方法设计导引律。

首先设计严格正的函数 $Q(x, t)$ 和 $R(x, t)$ 。

$$Q(x, t) = \frac{1}{2}cx_2^2 \quad (10)$$

$$R(x, t) = c_1x_2^2 + c_2x_2^4 \quad (11)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, 当 x_2 满足

$$\dot{Q}(x, t) \leq -R(x, t) \quad (12)$$

则系统相对于 x_2 是渐进稳定的。因此, 对式(10)求导并列 Lyapunov 不等式

$$cx_2[-a_1(t)x_1 - a_2(t)x_2 - b(t)a] \leq -c_1x_2^2 - c_2x_2^4 \quad (13)$$

当 $a_1(t) = 0$ 且 $c_1 \ll c$ 时,解不等式可得:

$$a = kx_2 + N_1 x_2^3 \quad (14)$$

其中, $k > -\frac{a_2(t)}{b(t)}$ 即 $k > 2v_{cl}$, 且 $N_1 > 0$ 。

因此,无人机碰撞规避导引律计算公式为:

$$a = Nv_{cl}\dot{\theta} + N_1\dot{\theta}^3, N > 2, N_1 > 0 \quad (15)$$

式(15)可改写为:

$$a = (N + \frac{N_1}{v_{cl}}\dot{\theta}^2)v_{cl}\dot{\theta} = N(t)v_{cl}\dot{\theta} \quad (16)$$

从式(16)可看出,与文献[14]相比,式(16)导引律具有系数时变的特性,即当视线变化率大时,比例系数较大,系统更快地趋于稳定;视线角速率变小时,噪声会增大,因此系数减小可增加制导的鲁棒性。

图3中 λ 为视线向量与碰撞规避向量之间的夹角,显然

$$\theta = \phi + \lambda$$

对 θ 进行微分,得:

$$\dot{\theta} = \dot{\phi} + \dot{\lambda} = -\left[\frac{v_{rel}\sin\psi_{rel}}{R_T\cos\phi} + \frac{\dot{R}_T}{R_T}(\tan\phi + \tan\lambda) \right] \quad (17)$$

其中: $\lambda = R_p/\sqrt{R_T^2 - R_p^2}$, $\sin\phi = (y_T - y)/R_T$, $\cos\phi = (x_T - x)/R_T$, (x_T, y_T) 和 (x, y) 分别为入侵飞行器和无人机在惯性坐标系下的坐标。

2.3 算例分析

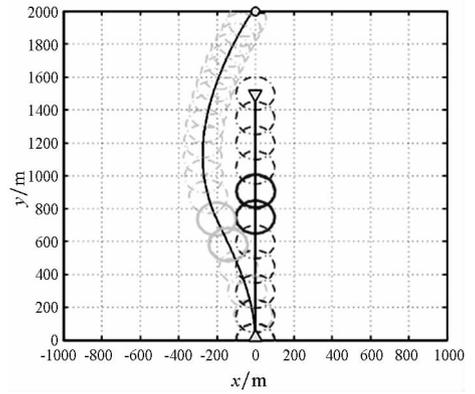
本节对2.2节设计的导引律进行仿真,选择导引律参数 $N = 3, N_1 = 10$, 设置无人机与入侵飞行器正对飞行,具体参数见表1。

表1 碰撞规避仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of collision avoidance

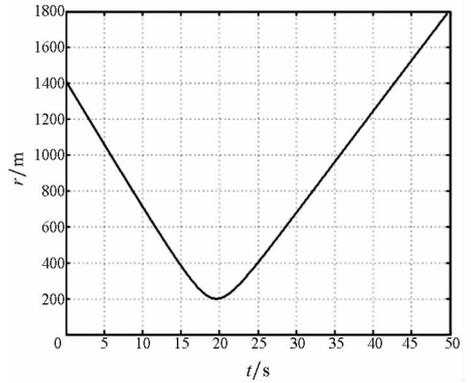
情形1	
无人机初始位置/m	(0,0)
无人机目标位置/m	(0,2000)
无人机初始速度/(m/s)	(0,50)
入侵飞行器初始位置/m	(0,1500)
入侵飞行器飞行速度/(m/s)	(0,-50)
最小安全距离/m	200
无人机极限过载(g)	(1,1)

仿真结果如图5所示。图5(a)为无人机碰撞规避轨迹,浅色圆曲线为无人机飞行轨迹,深色圆曲线为入侵飞行器轨迹。圆半径为100 m,用于更好地展示碰撞规避效果。图5(b)为无人机与障碍物之间的距离随时间变化曲线,从图5(b)



(a) 飞行轨迹

(a) Trajectories of two UAVs



(b) 两机距离

(b) Distance between UAVs

图5 碰撞规避仿真结果

Fig.5 Simulation results of UAV collision avoidance

中可以看出,大约20 s时,无人机与障碍物最小距离为200 m,即到达虚拟目标点,完成碰撞规避。

当选择 $N_1 = 0$ (纯比例导引), $N_1 = 30, N_1 = 300, N_1 = 500$ 时,其余仿真参数不变,无人机碰撞规避轨迹如图6所示。从图6中可以看出,论文设计的导引律能够在无人机与目标距离较远、视线变化较小时提前做出机动规避,使系统更快地趋于稳定,完成碰撞规避。

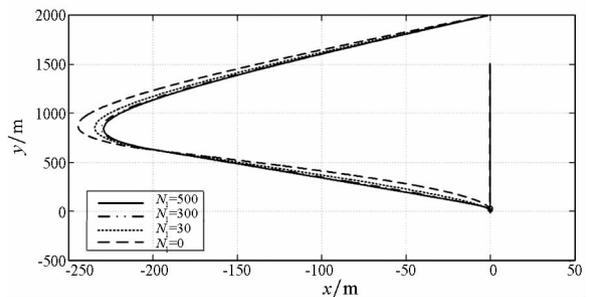


图6 不同参数 N_1 的碰撞规避轨迹

Fig.6 Collision avoidance trajectories with different parameter N_1

3 目标跟踪导引律设计

3.1 导引律设计

无人机跟踪空中目标,既需要到达目标后方的指定位置,又需要对目标进行持续跟踪。该过程可认为是无人机与虚拟目标点交会的过程,要求无人机除在某一时刻与虚拟目标点位置一致外,还需保证速度一致从而对目标进行持续稳定跟踪。在 2.2 节设计的导引律的基础上,设计无人机跟踪空中目标的导引律。

将无人机的运动在沿着视线和垂直视线方向进行分解,沿着视线方向的运动可表示为:

$$\dot{r}(t) - r(t) \sum_{s=1}^3 \dot{\lambda}_s^2(t) = a_{Tr}(t) - a_{Mr}(t) \quad (18)$$

其中, $\lambda_s = R_s/r$ ($s=1,2,3$), r 为无人机与目标之间的距离, R_s 分别为距离 r 在惯性坐标系坐标轴 x, y, z 上的投影。

引入虚拟加速度:

$$a_{Mr1}(t) = a_{Mr}(t) - r(t) \sum_{s=1}^3 \dot{\lambda}_s^2(t) \quad (19)$$

代入式(18),得:

$$\ddot{r}(t) = a_{Tr}(t) - a_{Mr1}(t) \quad (20)$$

根据上文所述交会过程要求,无人机跟踪空中目标过程中,首先要达到虚拟目标点。到达虚拟目标点的同时,无人机的速度与目标的速度一致,从而进行持续的跟踪。

按照 2.2 节求解导引律的方法,考虑平行导引法,设计一般意义下无人机到达虚拟目标点的导引律。在三维坐标系中,无人机与目标视线向量可表示为:

$$\vec{\lambda} = \lambda_1(t)\vec{r} + \lambda_2(t)\vec{p} + \lambda_3(t)\vec{q} \quad (21)$$

对 $\lambda_s = R_s/r$ ($s=1,2,3$) 进行求导并构建系统状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_1(t)x_1 - a_2(t)x_2 - b(t)a_{is} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $x_1 = \lambda_s(t)$, $x_2 = \dot{\lambda}_s(t)$ 。

实现零视线转率,欲使飞行器最终趋近于平行接近的方式到达目标。因此,导引律设计问题可以转换为选择控制量 u 来保证系统中的 x_2 是渐进稳定的。构建 Lyapunov 方程,得:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 d_s \dot{\lambda}_s^2 \quad (23)$$

$$R(x, t) = c_1 x_2^2 + c_2 x_2^4 \quad (24)$$

其中, d_s 为常数。

构建 Lyapunov 不等式并求解得到:

$$a_{is} = N\dot{r}\dot{\lambda}_s + \sum_{j=1}^3 a_{isjk}, s = 1, 2, 3 \quad (25)$$

$$a_{is1} = N_1 v_{cl} \dot{\lambda}_s^3, N_1 > 0$$

$$a_{is2} = N_{2s} \lambda_s(t) \ddot{r}, N_{2s} \begin{cases} \leq 1, \text{sign}[\dot{r}(t)\dot{\lambda}_s(t)\lambda_s(t)] \geq 0 \\ > 1, \text{sign}[\dot{r}(t)\dot{\lambda}_s(t)\lambda_s(t)] < 0 \end{cases}$$

$$a_{is3} = N_{3s} a_{Ts}(t), N_{3s} \begin{cases} \leq 1, \text{sign}[\dot{r}(t)\dot{\lambda}_s(t)\lambda_s(t)] \geq 0 \\ > 1, \text{sign}[\dot{r}(t)\dot{\lambda}_s(t)\lambda_s(t)] < 0 \end{cases}$$

沿着视线方向的导引律设计为:

$$\begin{aligned} a_{Mr1}(t) &= k_2 [v_{Tr}(t) - v_{Mr}(t)] + a_{Tr}(t) + k_3 r(t) \\ &= k_2 \dot{r}(t) + a_{Tr}(t) + k_3 r(t) \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $v_{Tr}(t)$ 和 $v_{Mr}(t)$ 为无人机和虚拟目标点在视线方向的速度投影, k_2 和 k_3 为正系数。

将 $a_{Mr1}(t)$ 代入式(20)中得:

$$\ddot{r}(t) = -k_2 \dot{r}(t) - k_3 r(t) \quad (27)$$

式(27)是渐进稳定的系统,即无人机与虚拟目标点的距离趋近于 0,同时 $\dot{r}(t)$ 也趋近于 0。此外,也可选择系数 k_2, k_3 使无人机在与虚拟目标点会合过程中, $\dot{r}(t) < 0$ 。

因此,无人机跟踪空中目标的导引律为两个导引向量的叠加。

$$\begin{aligned} a_{Ms} &= Nv_{cl}\dot{\lambda}_s(t) + N_1\dot{\lambda}_s^3(t) + (1 - N_{2s})r(t) \sum_{s=1}^3 \dot{\lambda}_s^2(t)\lambda_s(t) \\ &+ [k_2\dot{r}(t) + k_3r(t)]\lambda_s(t) + a_{Ts}, s = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (28)$$

当选择制导参数 $N_{2s} = 1$ 时,式(28)简化为:

$$\begin{aligned} a_{Ms} &= Nv_{cl}\dot{\lambda}_s(t) + N_1\dot{\lambda}_s^3(t) + [k_2\dot{r}(t) + \\ &k_3r(t)]\lambda_s(t) + a_{Ts} \end{aligned} \quad (29)$$

3.2 算例分析

无人机将对机动目标进行跟踪,且目标状态信息不完全精确,带有高斯白噪声干扰。对做协调转弯运动的目标进行跟踪。在无人机发现目标时,无人机的位置为(100 m, -700 m, 4500 m),速度为(0 m/s, 60 m/s, 0 m/s),目标位置为(2975 m, 235 m, 5000 m)并以 60 m/s 的速度以圆心为(1850 m, 0 m, 5000 m)在 $x-y$ 平面上做协调转弯运动,垂直方向不做机动。无人机发现目标后,对目标进行跟踪,并以目标速度方向后方 300 m 作为虚拟目标点。虚拟目标点在 x, y, z 方向的位置噪声均值为 0,方差为 900 m^2 的高斯噪声;速度噪声为均值为 0,方差为 25 m^2/s^2 的高斯噪声。

经过反复实验,选择参数 $N = 3, N_1 = 0, k_2 = 0.1, k_3 = 0.05$,得到仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,无人机能够顺利地到达虚拟目标点,并

对目标进行持续跟踪。

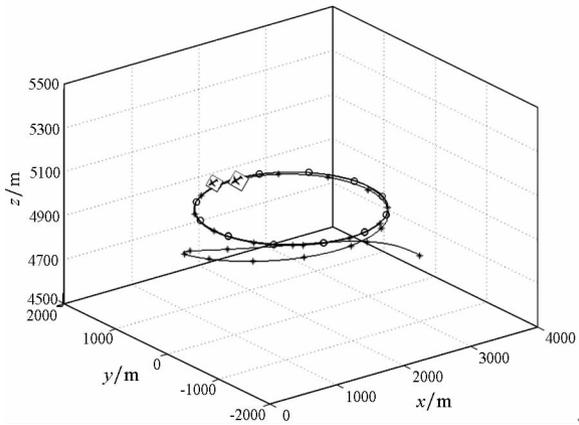


图7 目标跟踪仿真结果

Fig. 7 Simulation result of target tracking

4 基于 Gazebo 平台的运动导引仿真

为进一步验证所提方法的有效性,共设计三组实验,分别为无人机规避空中目标、无人机跟踪目标飞行器及无人机在障碍环境跟踪目标飞行器。实验中在 Gazebo 中构建两架四旋翼无人机, UAV₁ 和 UAV₂。UAV₁ 作为无人机,UAV₂ 作为空中目标,UAV₁ 对 UAV₂ 进行跟踪及规避,UAV₂ 按预定飞行计划飞行。

4.1 碰撞规避仿真

4.1.1 碰撞规避仿真设计

设置两种实验想定,在 Gazebo 上进行仿真验证。想定1中,无人机与入侵飞行器正面遭遇,想定2为90°遭遇,两个想定无人机安全区域均为半径为 r 的圆。具体仿真参数见表2。

表2 碰撞规避综合仿真参数

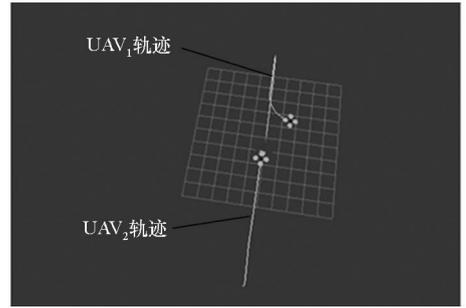
Tab.2 Integrated simulation parameters of collision avoidance

	想定1	想定2
UAV ₁ 初始位置/m	(0,0,10)	(0,0,10)
UAV ₁ 目标位置/m	(0,30,10)	(0,30,10)
UAV ₁ 初始速度/(m/s)	(0,1,0)	(0,1.5,0)
UAV ₂ 初始位置/m	(0,15,10)	(-10,10,10)
UAV ₂ 飞行速度/(m/s)	(0,-1,0)	(1.5,0,0)
最小安全距离/m	3	2
无人机极限过载(g)	(1,1)	(1,1)

4.1.2 碰撞规避仿真结果分析

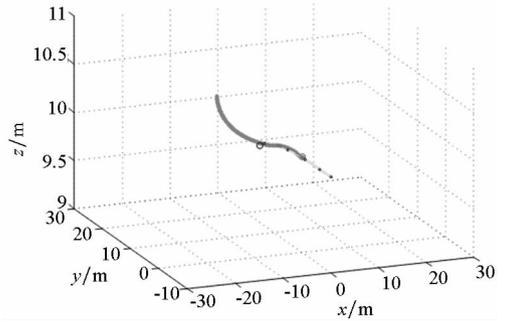
在 Gazebo 平台上对两个想定开展仿真验证,并对仿真数据进行采集,后期在 MATLAB 中进行处理。两个想定的部分仿真过程以及无人机飞行

轨迹分别如图8、图9所示。图8(a)为在 Gazebo 中进行实验,使用 Rviz 软件记录并显示的轨迹。



(a) Rviz 软件轨迹

(a) Trajectories from Rviz

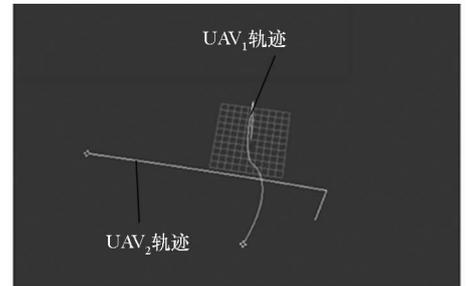


(b) MATLAB 轨迹

(b) Trajectories from MATLAB

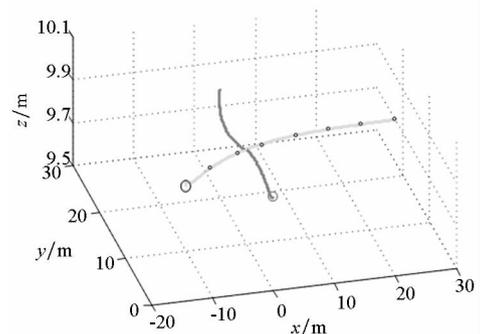
图8 想定1 仿真结果

Fig. 8 Simulation results of case 1



(a) Rviz 软件轨迹

(a) Trajectories from Rviz



(b) MATLAB 轨迹

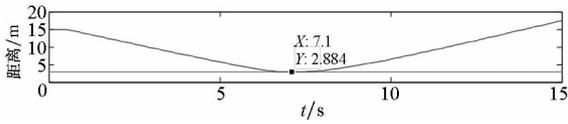
(b) Trajectories from MATLAB

图9 想定2 仿真结果

Fig. 9 Simulation results of case 2

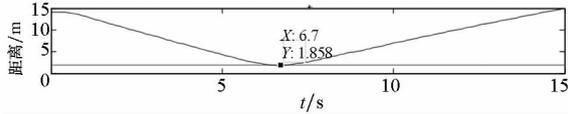
图 8(b)是将采集的仿真数据在 MATLAB 中处理后画出的无人机与目标的飞行轨迹,其中深色曲线表示 UAV₁ 的飞行轨迹,浅色加圆点曲线表示 UAV₂ 的飞行轨迹,小圆代表无人机起始位置。

两个想定实验无人机与目标之间的距离如图 10 所示。从图 10 中可以看出,想定 1 和想定 2 仿真过程中,UAV₁ 与 UAV₂ 最小距离分别为 2.844 m 和 1.858 m。由于底层控制等相关因素,最小距离略小于预设最小安全距离,但偏差总体不大,可认为 UAV₁ 成功完成了碰撞规避。



(a) 想定 1

(a) Case 1



(b) 想定 2

(b) Case 2

图 10 UAV₁ 与 UAV₂ 之间的距离

Fig. 10 Distance between UAV₁ and UAV₂

4.2 目标跟踪仿真

4.2.1 目标跟踪仿真设计

在目标跟踪导引律验证仿真中使用两架旋翼飞行器 UAV₁ 和 UAV₂ 分别模拟无人机以及空中目标。

假定 UAV₂ 以速率 2 m/s,角速率为 10°/s 做协调转弯运动,起始位置为 (-10 m, 10 m, 10 m),UAV₁ 起始位置为(0 m,0 m,10 m)。选择目标速度方向的正后方 4 m 作为虚拟目标点,虚拟目标点速度与目标速度大小一致。

4.2.2 目标跟踪仿真结果分析

在 Gazebo 平台上进行仿真,对数据进行采集,并在 MATLAB 中进行处理。图 11 为用 Rviz 软件记录并显示的 UAV₁ 对 UAV₂ 跟踪轨迹,图 12~14 为使用 MATLAB 对采集的数据进行处理后的结果。

从图 11 中可看出,UAV₁ 能够成功到达 UAV₂ 后方的虚拟目标点并对 UAV₂ 进行持续跟踪。图 12 为使用 MATLAB 对实验数据进行处理得出的无人机跟踪协调转弯目标的飞行轨迹。图 13为无人机与目标在 x, y, z 方向的距离和速度差。图 14 为 UAV₁ 与 UAV₂ 之间的距离曲线,从图 14 中可以看出,UAV₁ 与 UAV₂ 的距离在 4 m 上下波动,说明无人机成功对目标进行持续跟踪。

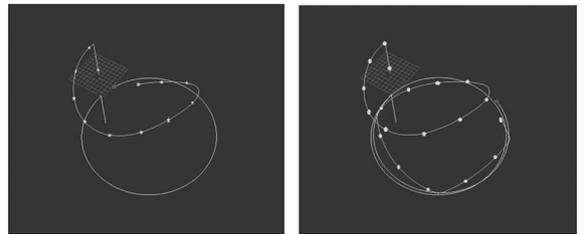


图 11 目标飞行器跟踪实验 Rviz 软件记录的轨迹

Fig. 11 Simulation results of UAV target tracking from Rviz

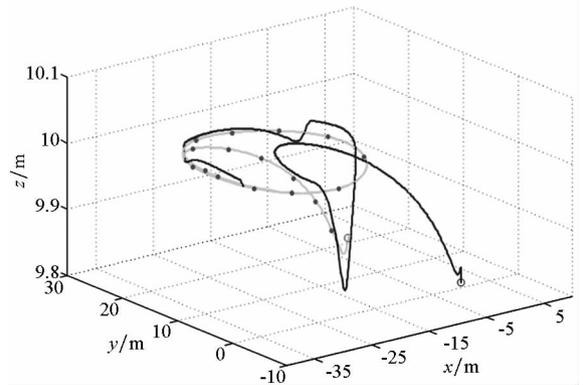
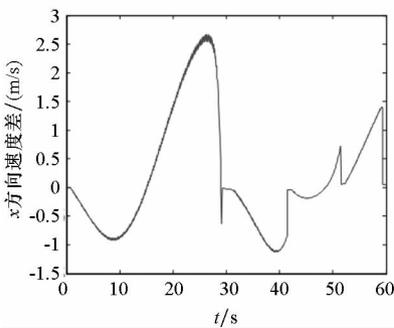


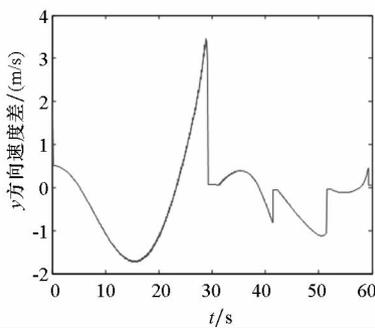
图 12 目标飞行器跟踪无人机轨迹

Fig. 12 Simulation results of UAV target tracking



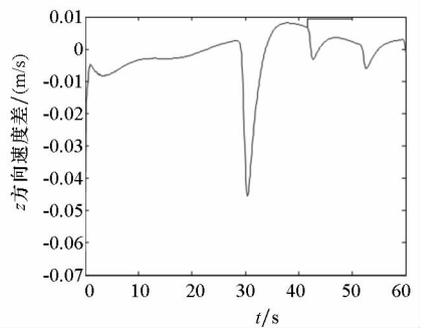
(a) x 方向速度差

(a) Velocity difference in x direction



(b) y 方向速度差

(b) Velocity difference in y direction



(c) z 方向速度差

(c) Velocity difference in z direction

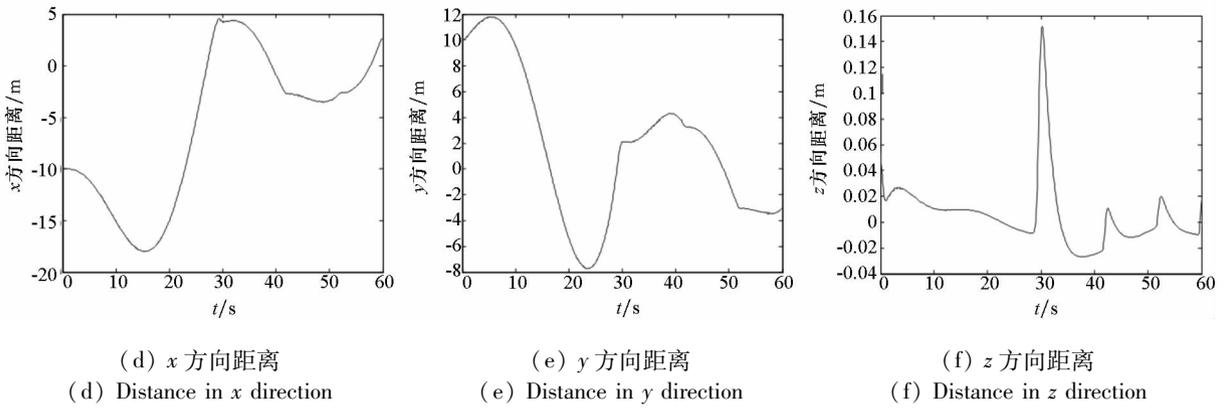


图 13 无人机与目标飞行器之间速度与位置差

Fig. 13 Position and velocity difference between the UAV and the target

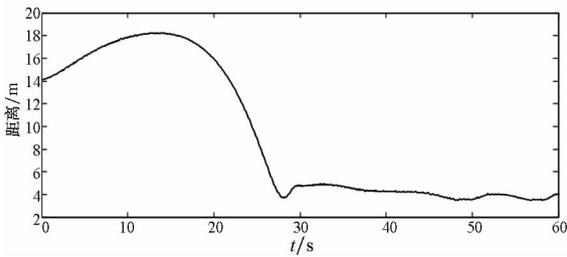


图 14 无人机与目标之间的距离

Fig. 14 Distance between the UAV and the target

间最小距离为 1.985 m,略小于预设距离,但可认为其成功实现了碰撞规避。此外,无人机与目标飞行器之间的距离趋于 4 m,成功与虚拟目标点交会并对目标进行持续跟踪。

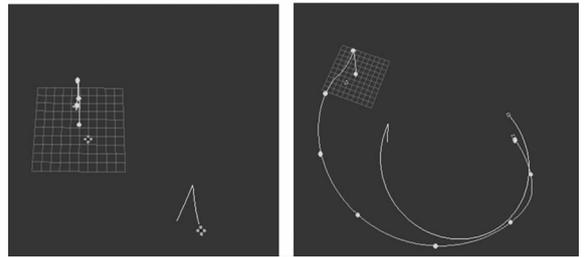


图 15 障碍环境下目标飞行器跟踪实验

Rviz 软件记录的轨迹

Fig. 15 Simulation results of UAV target tracking in obstacle environment from Rviz

4.3 障碍环境下的目标跟踪仿真

4.3.1 障碍环境下的目标跟踪仿真设计

前两组实验分别对无人机碰撞规避和目标飞行器跟踪开展了仿真验证。本节将无人机跟踪或规避放入同一种场景,使用三架旋翼无人机 UAV₁, UAV₂, UAV₃ 模拟无人机、空中目标和障碍物,使无人机在存在障碍的环境下对空中目标进行跟踪。

无人机起始位置为(0 m, 0 m, 10 m),且以 1.5 m/s 的速度向 y 轴正方向运动。障碍物位置(-1 m, 6 m, 10 m),目标飞行器飞行过程同 4.2 节。无人机最小安全距离为 2 m。

4.3.2 障碍环境下的目标跟踪仿真结果分析

仿真结果如图 15 ~ 17 所示,其中图 15 为用 Rviz 软件记录并显示的 UAV₁ 对 UAV₂ 跟踪轨迹,图 16 和图 17 为使用 MATLAB 对采集的数据进行处理后的结果。

从图 15 和图 16 中可看出,无人机首先对障碍物进行规避,接着与虚拟目标点交会,对目标进行跟踪。图中目标飞行器轨迹与 4.2 节实验相同,而对比图 15 和图 11,无人机飞行轨迹有明显区别。图 17 为无人机分别与障碍物和目标飞行器的距离。从图 17 中可以看出,无人机与障碍之

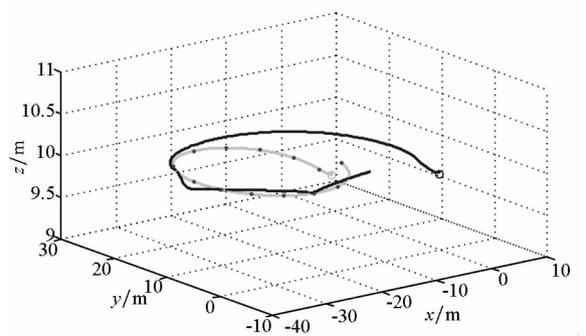
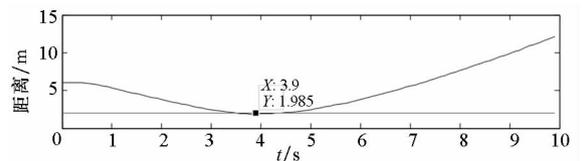


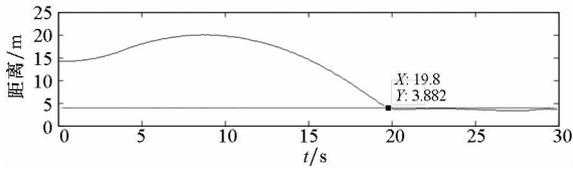
图 16 障碍环境下目标飞行器跟踪实验无人机轨迹

Fig. 16 Trajectories of UAV target tracking in obstacle environment



(a) 无机与障碍物之间的距离

(a) Distances between UAV and obstacle



(b) 无人机与目标飞行器之间的距离
(b) Distances between UAV and target

图 17 无人机与障碍物和目标飞行器之间的距离

Fig. 17 Distances between UAV and obstacle,
UAV and target

5 结论

本文针对无人机碰撞规避及机动目标跟踪这一类非线性导引控制问题,首先建立了统一的基于导引律方式的无人机运动导引框架,然后针对各自问题的特点,基于 Lyapunov 稳定性理论分别设计了无人机碰撞规避和目标跟踪导引律,最后在 Gazebo 平台上进行了综合仿真,针对无人机规避空中目标、跟踪目标飞行器以及无人机在障碍环境跟踪目标飞行器等典型场景进行验证。从仿真结果可以看出:所设计的导引律能够成功地实现对空中障碍的碰撞规避以及对空中机动目标的有效跟踪,可有效避免大过载情况的出现,具有较强的时变和参数适应性。所提方法可为基于导引律方式的无人机运动导引问题提供一种一般意义上的范式。

参考文献 (References)

- [1] Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap: FY2013 - 2038 [R]. US: Department of Defense, 2013.
- [2] Smith N E, Cobb R G, Pierce S J, et al. Optimal collision avoidance trajectories via direct orthogonal collocation for unmanned/remotely piloted aircraft sense and avoid operations[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA 2014 - 0966, 2014, 252: 71 - 80.
- [3] Lawrence D A, Frew E W, Pisano W J. Lyapunov vector fields for autonomous unmanned aircraft flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(5): 1220 - 1229.
- [4] Tyler H S, Akella M R, Mears M J. Coordinated standoff tracking of moving targets: control laws and information architectures [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(1): 56 - 69.
- [5] Chen H, Chang K, Agate C S. Tracking with UAV using tangent-plus lyapunov vector field guidance[C]//Proceedings of 12th International Conference on Information Fusion (FUSION'09), 2009: 363 - 372.
- [6] Yamasaki T, Sakaida H, Enomoto K, et al. Robust trajectory-tracking method for UAV guidance using proportional navigation [C]//Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, 2007: 1404 - 1409.
- [7] Ambrosino G, Ariola M, Ciniglio F, et al. Path generation and tracking in 3D for UAVs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(4): 980 - 988.
- [8] Sarkar A K, Ghose D. Realistic pursuer evader engagement with feedback linearization based nonlinear guidance law[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA 2006 - 6096, 2006: 21 - 24.
- [9] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. Nonlinear and adaptive control design [M]. US: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [10] Srivastava R, Sarkar A K, Ghose D, et al. Nonlinear three dimensional composite guidance law based on feedback linearization [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA 2004 - 4903, 2004: 1 - 11.
- [11] Jung D, Tsiotras P. Bank-to-turn control for a small UAV using backstepping and parameter adaptation [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 4406 - 4411.
- [12] Lechevin N, Rabbath C A. Backstepping guidance for missile modeled as uncertain time-varying first-order systems [C]//Proceedings of American Control Conference (ACC'07), 2007: 4582 - 4587.
- [13] 牛轶峰, 潘崇煜, 吴雪松. 无人机自主制导技术研究现状[C]//2013 中国自动化大会论文集, 2013: 1 - 6.
NIU Yifeng, PAN Chongyu, WU Xuesong. The state of art of autonomous guidance of unmanned aerial vehicles [C]//Proceedings of 2013 Chinese Automation Congress Symposium, 2013: 1 - 6. (in Chinese)
- [14] Han S C, Bang H, Yoo C S. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2009, 7(4): 553 - 565.
- [15] Yanushevsky R. Guidance of unmanned aerial vehicles [M]. US: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.