

文章编号:1674-8190(2015)04-427-06

无人机航迹跟踪抗侧风制导算法

冒云慧,陈清阳,侯中喜,郭正

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院,长沙 410073)

摘要: 无人机作为航空飞行器的一种,具有诸多应用价值,精确的航迹跟踪是其完成飞行任务的必要条件。在无人机飞行控制系统的制导外回路,实现一种具有抗风性能的横向非线性制导算法(NLIG),基于航迹参考点实时测算无人机侧向加速度,并根据无人机力学方程得到滚转角指令,实现无人机的航迹跟踪。该制导算法只需确定合适的距离参数 L ,即可实现较为精确地制导,加入反馈环节以得到改进的闭环非线性制导算法。在侧风条件下进行仿真分析,结果表明:改进后的非线性制导算法是正确的,其具有良好的抗风性能。

关键词: 无人机;航迹跟踪;非线性制导;反馈算法;抗风性能

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2015.04.005

Guidance Algorithm with Lateral Wind Resistance for UAV Path Tracking

Mao Yunhui, Chen Qingyang, Hou Zhongxi, Guo Zheng

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, ChangSha 410073, China)

Abstract: As a kind of the aeronautic aircraft, UAV(unmanned aerial vehicle) is born to be of practical application value. Accurate path tracking is a necessary condition for UAV to complete the flight task. A non-linear guidance(NLIG) algorithm for UAV path tracking is realized in the guidance outer-loop of the UAV flight control system, which is of the lateral wind resistance. Based on the virtual target on the path, the algorithm will instantaneously calculate the desired lateral acceleration of the UAV, and then get the roll angle command by the UAV motion equation to finally realize the path tracking of UAV. This guidance method can work on quite accurately only with the appropriate distance parameter L . A feedback term is considered and added to get the modified one in closed loop. Simulation experiments are conducted under the lateral windy settings. The results show that the modified nonlinear guidance algorithm is accurate, and is of good wind resistance.

Key words: UAV; path tracking; nonlinear guidance; feedback algorithm; wind resistance

0 引言

无人机能自主跟踪给定的航路点飞行,可用于军事侦察、地面勘测等任务,同时具有耗费资源少、成本低、经济效益大等特点;对于作战,无人机能有效减少人员伤亡,提高战斗能力。因此,世界各国竞相开展针对各类无人机的飞行控制及功能应用

方面的研究。无人机种类多样,精确的航迹跟踪是任何一种无人机完成飞行任务的必备条件^[1],航迹跟踪算法主要用于解决其航迹跟踪问题。

已有大量文献详细讨论了无人机的航迹跟踪算法。其中以比例引导算法(Proportional Navigation)、追踪制导算法(Pursuit Guidance)等为代表的古典制导算法,重点在于中途拦截而不是航迹跟踪^[2-4];视场制导算法(Line-of-Sight Guidance)可以用于航迹跟踪,但无法有效消除航迹侧偏距^[5]。Dale A. Lawrence等^[6-7],D. R. Nelson等^[8]利用现代控制理论研究了一种基于向量场(Vector-Field-Based)的制导方法,并分析了该方法的李雅普诺夫

收稿日期:2015-09-15; 修回日期:2015-09-22

基金项目:中国博士后科学基金(2014M562652)

通信作者:郭正,guozheng@nudt.edu.cn

稳定性。虽然现代控制理论有许多新型的航迹跟踪算法,但在实际应用中,普遍采用的跟踪算法仍然是基于经典 PID (Proportional-Integral-Differential) 的控制算法^[9],该算法的跟踪精度低于文献[10-11]所研究的非线性算法^[12]。I. Rhee 等^[13]在 PID 控制算法中加入前馈环节,明显地提高了该算法的跟踪性能。

上述各种方法的跟踪精度均无风条件下获得。然而无人机飞行环境中不可避免地存在自然风等扰动,尤其当侧风较大时,对航迹跟踪的影响更为明显。侧风情况对制导算法的稳定性以及跟踪精度均有较高要求。Sanghyuk Park 等^[10]研究了一种非线性制导算法,利用理想航迹上的虚拟目标点,以及飞行器的实时惯性速度推算侧向加速度指令,并提供了可对抗外界扰动(例如自然风等)的稳定性。随后,Sanghyuk Park 又将此算法拓展应用于三维航迹跟踪的问题,并展示了一系列成功的飞行试验结果^[14]。Mangal Kothari 等^[15]考虑了有风环境下无人机的飞行情况,将追踪制导算法与视场制导算法结合成一种新的 PLOS 算法,当外界风场速度高达飞行速度的 50%,仍可准确跟踪直线、圆形等各种航线。上述两种方法研究了风场下的航迹跟踪问题,但其跟踪精度尚未进行对比验证。

P. B. Sujit 等^[16]列举了五种不同的无人机跟踪制导算法,对比其跟踪直线和圆形航线两种典型轨迹的表现,通过控制过程实现的难易程度和航迹偏差量来评价跟踪算法的优劣性。该五种算法包含了非线性制导算法、向量场算法以及 PLOS 算法。文献[16]对五种制导算法综合比较后指出,非线性制导算法具有较好的跟踪效果,其跟踪直线与曲线的基本思想相同,因此可跟踪任意曲线;向量场算法跟踪精度最高,但调试参数众多;PLOS 算法的操作简单,但跟踪曲线的效果不及非线性制导算法,且比例系数的选取对跟踪效果有较大影响。

综上所述,目前的一些跟踪算法未充分考虑存在侧风的飞行环境,虽然非线性制导算法和 PLOS 算法考虑了侧风环境,但两者的跟踪效果未有直观对比。本文针对非线性制导算法,研究其改进前后的航迹跟踪表现,并给出存在侧风情况下的仿真曲线,将其抗侧风性能与 PLOS 算法进行对比,以验证非线性制导算法的正确性及抗风性能。

1 无人机飞行及风场建模

要跟踪期望的航迹,首先需确定无人机在空间的飞行轨迹。无人机飞行过程中,其质心的运动学方程在惯性坐标系中表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \cos \Psi \\ \dot{y} = v \cos \theta \sin \Psi \\ \dot{z} = -v \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ψ 、 θ 分别为惯性坐标系下无人机的偏航角、俯仰角; v 为惯性坐标系下的飞行速度; \dot{x} 、 \dot{y} 、 \dot{z} 分别为沿惯性坐标系的三轴速度, x 轴指向正东方, y 轴指向正北方, z 轴垂直水平面,三轴构成右手坐标系。

针对本文所研究的制导问题,其模型建立在二维水平面内,假设无人机飞行高度恒定,即俯仰角 θ 恒为 0,方程(1)可简化为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \Psi \\ \dot{y} = v \sin \Psi \\ \dot{z} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)即为外回路制导过程中无人机速度模型所用基本关系式。

考虑外界风场时,认为风扰动可以沿 x 、 y 方向分解,作用在无人机的速度分量上。

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \Psi + v_{wind,x} \\ \dot{y} = v \sin \Psi + v_{wind,y} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_{wind,x}$ 对应正东方向; $v_{wind,y}$ 对应正北方向。

最终的风速 v_{wind} 以及在风场下无人机的最终速度 v_{UAV} 分别为

$$\begin{cases} v_{wind} = \sqrt{v_{wind,x}^2 + v_{wind,y}^2} \\ v_{UAV} = \sqrt{(v \cos \Psi + v_{wind,x})^2 + (v \sin \Psi + v_{wind,y})^2} \end{cases} \quad (4)$$

2 无人机飞行控制系统

无人机能否顺利完成飞行任务取决于其完整的控制系统,上层决策系统确定制导与控制策略,划分各个回路,并确定各回路之间的关系。例如,外回路制导与内回路控制相结合,辅以必要的前馈控制,以实时保证无人机实现稳定、可靠、理想飞行的目标。

无人机飞行控制系统结构如图 1 所示。

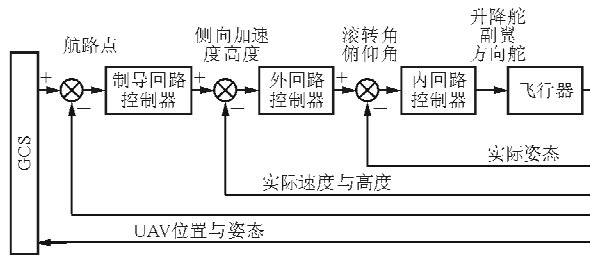


图 1 无人机飞行控制系统闭环框图

Fig. 1 Closed loop frame of UAV flight control system

GCS(Ground Control System)地面控制系统负责指挥整个系统,当飞行任务改变,GCS 将及时传送新的目标航点给飞行控制系统。制导回路的主要工作是处理无人机与期望航迹之间的关系,生成期望指令(例如速度、航向角等)。在得到制导回路期望指令和无人机信息的基础上,外回路和内回路分别负责各自的控制任务。外回路产生期望滚转角和俯仰角指令以控制无人机跟随预先设定的航向角和速度;内回路则据此产生相应的方向舵、副翼等指令,以使无人机获得正确的飞行姿态。

本文将在其他回路保持不变的条件下,在制导回路实现并改进非线性制导算法,进一步验证存在风场时该算法的航迹跟踪能力。

3 横向非线性制导算法

利用无人机实时惯性速度,以及飞行速度和线段 L 之间的夹角 η ,推导非线性方法的制导指令式,并根据实际仿真情况做出改进。

3.1 非线性制导思想

非线性制导方法的几何示意图如图 2 所示,期望航迹上的虚拟目标点由无人机位置和一个给定的距离 L 决定。

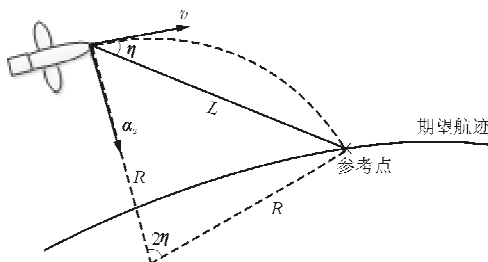


图 2 非线性制导方法几何示意图

Fig. 2 Geometric drawing of nonlinear guidance algorithm

在期望航迹上确定一航迹参考点,使其与无人

机位置的直线距离为 L ,且位于无人机飞行方向前方,此即无人机的瞬时飞行目标点。假设无人机做圆周运动,则根据几何学知识,其飞行半径 R 为

$$R = \frac{L}{2\sin\eta} \quad (5)$$

根据牛顿第二定律,侧向加速度 α_s 为

$$\alpha_s = \frac{v^2}{R} \quad (6)$$

联立式(5)~式(6),可用 L, η 表示其期望的侧向加速度:

$$\alpha_s = \frac{2v^2 \sin\eta}{L} \quad (7)$$

根据飞行动力学,当无人机在空中水平飞行时,即 $\theta=0$,满足本文假设,其重力和升力之间存在一定的平衡关系,如图 3 所示。

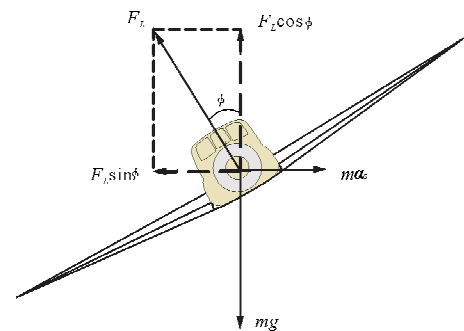


图 3 无人机空中重力与升力的平衡关系

Fig. 3 Relationship between weight and lift of UAV on air

因此,无人机的侧向加速度 α_s 和滚转角 ϕ 有如下关系:

$$mg \tan\phi = ma_s \quad (8)$$

通过式(7)~式(8),可以得到滚转角的表达式:

$$\phi = \arctan \frac{2v^2 \sin\eta}{gL} \quad (9)$$

式(9)中,影响 ϕ 的变量有 v, η, L ,其中 L 为常值, L 的选取需要综合考虑飞行器自身品质以及航迹跟踪精度的需求; v 的大小应为考虑了风速的 v_{UAV} ,由式(4)可知,风场的影响将作用于无人机的飞行速度 v_{UAV} 。由式(7)和式(9)可知,无人机飞行速度的大小及方向决定了横向加速度,并最终决定滚转角指令。这表明制导指令中考虑了风速的影响,其值会随风速的变化而改变,每一时刻生成的制导指令均是综合风速、无人机自身速度、无人机当前状态量以及航路信息而生成的,故航迹跟踪过程可适应风场的扰动,即抗风性能的原因。

3.2 改进的非线性制导算法

在控制系统中,制导所得滚转角指令经由内回路后受控制影响可能改变;由于无人机飞行系统的复杂性,实际副翼的舵偏量很难与指令一致;当存在风场时,式(8)水平飞行的条件不能完全满足,使得侧向加速度和滚转角之间的关系发生变化。因此制导回路计算所得的侧向加速度指令与无人机实际状态不可避免地存在偏差。

为了补偿实际侧向加速度与期望值之间的偏差,在制导回路加入反馈项。利用无人机实际飞行速度 v_e 及角速度 $\dot{\phi}_e$ 计算得到实际侧向加速度,求其与指令加速度的差值,并作用在指令加速度上,从而进行补偿。

式(7)改进后为

$$\alpha_s = \frac{2v^2 \sin\eta}{L} + K(\alpha_{s_last} - v_e \dot{\phi}_e) \quad (10)$$

式中: K 为反馈系数; α_{s_last} 为上一时刻的加速度指令。

改进后的制导回路结构如图 4 所示。

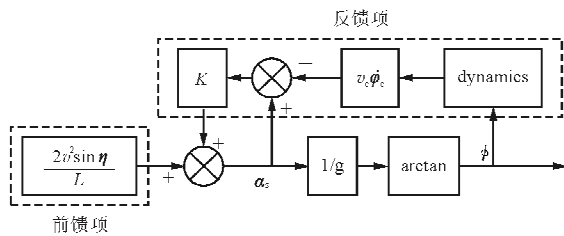


图 4 带反馈项的制导回路

Fig. 4 Guidance loop with feedback term

4 仿真分析

4.1 改进前后非线性制导算法跟踪效果对比

首先在无风条件下,利用改进前后的非线性制导算法,分别跟踪四边形直线航迹和圆形航迹,以验证改进前后的非线性制导算法的跟踪效果的差异。仿真条件为:航迹参考点与无人机距离 $L = 100$ m,反馈系数 $K = 0.5$,给定飞行速度 $v = 20$ m/s,此时令风速 $v_{wind} = 0$,则有 $v_{UAV} = v = 20$ m/s。改进前后非线性制导算法的跟踪效果如图 5~图 6 所示。图 5 为改进前后的非线性制导算法跟踪一

个边长为 500 m 的四边形航迹的仿真结果。图 6 设定的圆形航迹半径为 200 m,圆心在相对坐标系中,为(0,0)。

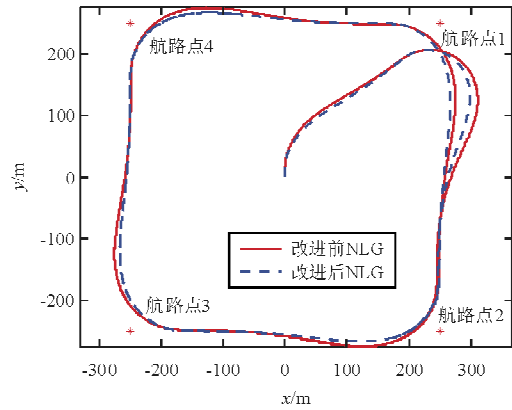


图 5 改进前后的非线性制导算法跟踪四边形航迹

Fig. 5 Tracking the quadrangle path by the original NLG algorithm and the modified one

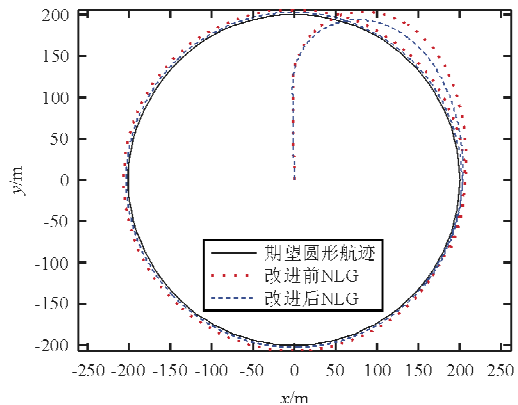


图 6 改进前后的非线性制导算法跟踪圆形航迹

Fig. 6 Tracking the circular path by the original NLG algorithm and the modified one

从图 5 可以看出:改进后算法所得轨迹在转弯时与改进前稍有不同,而在沿着直线飞行阶段两者基本吻合。

从图 6 可以看出:改进前后的算法跟踪得均较为精确,但是改进后的算法其侧偏距比改进前的更低,即与期望航迹的偏差更小。

改进前后的非线性制导算法跟踪圆形航迹的侧偏距及其均方根(Root Mean Square, 简称 RMS)如图 7 所示。

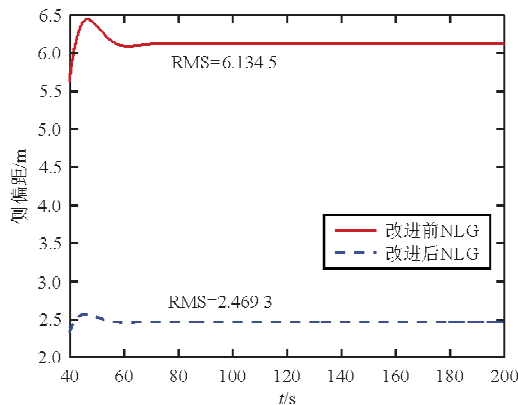


图 7 跟踪圆形航迹的侧偏距及其均方根

Fig. 7 Cross track error of the circular path tracking and the RMS of it

从图 7 可以看出:从 40 s 开始进入圆形轨道后,改进前算法的侧偏距均方根为 6.134 5,改进后算法的侧偏距均方根则降低为 2.469 3,且在稳定跟踪阶段两者的侧偏距均保持不变。

综合对比改进前后的非线性制导算法跟踪航迹的表现,发现改进后的算法加入了反馈项,降低了侧偏距的均方根,使四边形和圆形航迹的跟踪更为精确,证明了改进后算法的正确性。

4.2 改进的算法与 PLOS 算法抗风性能对比

设计一风场,令 $v_{wind,x}=7\text{ m/s}$, $v_{wind,y}=7\text{ m/s}$, 可得到风速约为 10 m/s 的西南风,风速定常。在该风场下仿真改进后的非线性制导算法及 PLOS 算法,分别跟踪边长为 1 500 m 的四边形航迹和半径为 200 m 的圆形航迹。仿真条件为:航迹参考点与无人机距离 $L=100\text{ m}$,反馈系数 $K=0.5$,给定飞行速度 $v=20\text{ m/s}$,此时 v_{UAV} 将随着飞行航向的变化而变化,仿真结果如图 8~图 10 所示。从图中可以看出:PLOS 算法与非线性制导算法均能在侧风条件下工作;PLOS 算法在有风情况下跟踪四边形航迹,顺风转弯时其跟踪精度有一定影响,但总体跟踪精度仍较高(图 8);非线性制导算法跟踪四边形航迹的抗风性能极好(图 9);两种算法分别跟踪圆形航迹,在侧风情况下均存在一定的跟踪侧偏距(图 10)。

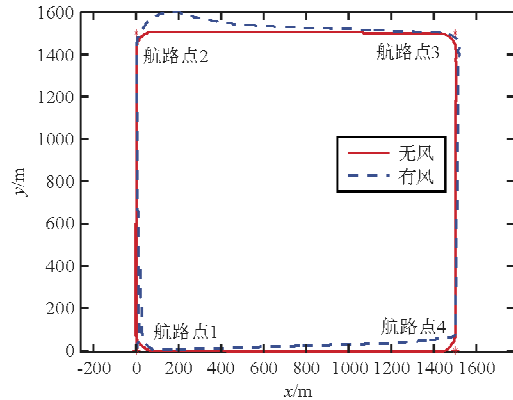


图 8 风场下 PLOS 算法跟踪四边形航迹

Fig. 8 Tracking the quadrangle path by PLOS algorithm in windy settings

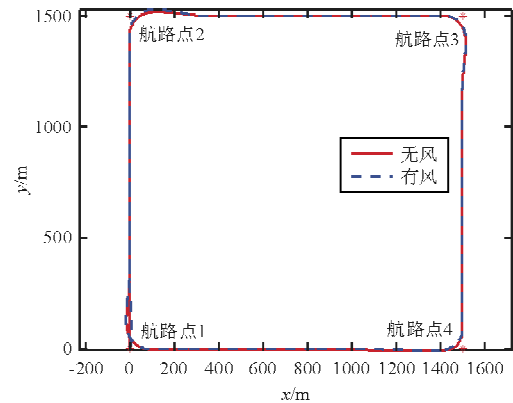


图 9 风场下改进的非线性制导算法跟踪四边形航迹

Fig. 9 Tracking the quadrangle path by modified NLG algorithm in windy settings

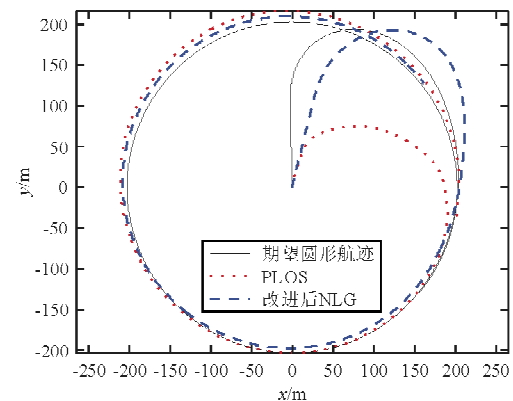


图 10 风场下两种算法跟踪圆形航迹

Fig. 10 Tracking the circular path by PLOS and modified NLG algorithms in windy settings

侧风条件下,PLOS 算法与非线性制导算法跟踪圆形航迹的侧偏距及其均方根如图 11 所示。

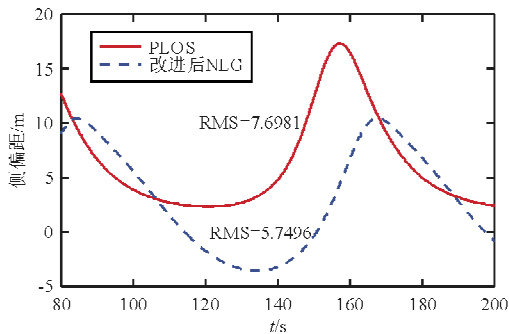


图 11 侧风条件下两种算法跟踪圆形航迹的侧偏距及其均方根

Fig. 11 Cross track error of the circular path tracking in windy settings and the RMS of it

从图 11 可以看出:选取进入圆形轨道后 80~200 s 时间段内的曲线进行侧偏距分析,因风场导致侧偏距不能保持恒定,而是随着风向与速度方向的夹角作周期性变化;PLOS 算法的侧偏距均方根为 7.698 1,非线性制导算法为 5.749 6,在风速高达飞行速度 50% 的情况下,可认为改进后的非线性制导算法的跟踪精度较高,更为精确。

5 结 论

(1) 非线性制导算法可以准确完成无人机航迹跟踪,可紧密跟踪四边形航迹和圆形航迹,其仿真结果的侧偏距较低。

(2) 改进后的非线性制导算法可以得到更好的跟踪效果,尤其是对于圆形航迹,其侧偏距的均方根可降低至改进前非线性制导算法的 40%。

(3) PLOS 算法和非线性制导算法均能在风场条件下跟踪四边形航迹和圆形航迹,且非线性制导算法的跟踪侧偏距相对更小。

(4) 非线性制导算法具有较好的抗风性能,下一步可考虑选择合适的 L 值,验证不同距离的四边形及圆形航迹的跟踪效果,实现无人机飞行试验。

参考文献

- [1] Sujit P B, Srikanth Saripalli, João Borges Sousa. An evaluation of UAV path following algorithms[C]// Proceedings of European Control Conference. IEEE, 2013: 3332-3337.
- [2] Hecht C. Homing guidance using angular acceleration of the line of sight[C]. AIAA-91-2701-CP, 1991.
- [3] Zhao Jiang, Zhou Rui, Dong Zhuoning. Three-dimensional cooperative guidance laws against stationary and maneuvering targets [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1104-1120.
- [4] Takeshi Yamasaki, Keisuke Enomoto, Hiroyuki Takano,

et al. Advanced pure pursuit guidance via sliding mode approach for chase UAV[C]. AIAA-2009-6298, 2009.

- [5] Rysdyk R. UAV path following for constant line-of-sight [C]// In 2nd AIAA Unmanned Systems Conference, San Diego, CA; 2003.
- [6] Dale A Lawrence, Eric W Frew, William J Pisano. Lyapunov vector fields for autonomous UAV flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(5): 1220-1229.
- [7] Eric W Frew, Dale A Lawrence, Steve Morris. Coordinated standoff tracking of moving targets using lyapunov guidance vector fields[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(2): 290-306.
- [8] Nelson D R, Barber D B, McLain T W, et al. Vector field path following for miniature air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 519-529.
- [9] Sun Meirui, Zhu Rongming, Yang Xueguang. UAV path generation, path following and gimbal control[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. 2008: 870-873.
- [10] Sanghyuk Park, John Deyst, Jonathan P Howz. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking[C]. AIAA-2004-4900, 2004.
- [11] Zhang Jiaming, Li Qing, Cheng Nong, et al. Nonlinear path-following method for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Zhejiang University-Science C(Computers & Electronics), 2013, 14(2): 125-132.
- [12] Sanghyuk Park, John Deyst, Jonathan P How. Performance and Lyapunov stability of a nonlinear path-following guidance method[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2007, 30(6): 1718-1728.
- [13] Rhee I, Park S, Ryoo C K. A tight path following algorithm of an uas based on PID control[C]// Proceedings of SICE Annual Conference. IEEE, 2010: 1270-1273.
- [14] Sanghyuk Park. Autonomous aerobatic flight by three-dimensional path-following with relaxed roll constraint[R]. AIAA-2011-6593, 2011.
- [15] Mangal Kothari, Ian Postlethwaite, Dawei Gu. UAV path following in windy urban environments[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3/4): 1013-1028.
- [16] Sujit P B, Srikanth Saripalli, João Borges Sousa. Unmanned aerial vehicle path following [J]. IEEE Control System Magazine, 2014, 34(1): 42-59.

作者简介:

曹云慧(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:无人机制导控制技术、多机编队控制方法。

陈清阳(1982—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器导航制导与控制、无人机编队飞行。

侯中喜(1973—),男,博士,教授。主要研究方向:临近空间飞行器技术。

郭正(1974—),男,博士,教授。主要研究方向:空气动力学、飞行器气动设计、计算流体力学。

(编辑:马文静)