

# 无人机三维编队飞行模糊 PID 控制器设计

肖亚辉, 王新民, 王晓燕, 余 翔

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:**针对无人机编队飞行控制系统,引入编队飞行几何关系,建立了三维编队飞行数学模型,在速度、航向和高度三个通道加入了误差的线性混合器,并分别设计了基于模糊 PID 的编队飞行控制器。仿真结果表明,所设计的控制器可以通过控制间距方便有效地控制无人机编队飞行,实现在机动过程中保持队形,以及合理地进行编队队形变换。这种控制方法超调量较小,鲁棒性强,优于传统控制器。

**关 键 词:**编队飞行,模糊 PID,编队保持与变换,鲁棒性

**中图分类号:**TP273, V279

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-2758(2011)06-0834-05

近年来,科学工作者基于仿生学研究,提出了无人机编队飞行的概念,旨在提高无人机的作战效率,减小能耗,弥补单机作战的不足。无人机编队飞行<sup>[1,2]</sup>是指两架或两架以上无人机为适应任务要求而组成某种队形,并在飞行过程中保持队形或根据外部情况及任务需求进行队形的调整变换。目前对于编队队形保持,已有相关研究,如 Elham 使用李亚普诺夫稳定性理论设计自适应编队飞行控制<sup>[3]</sup>,J. D. Boskovic 提出采用反馈线性化方法进行双机编队飞行控制<sup>[4]</sup>,Bin Zuo 使用常规的 PID 设计方法进行设计<sup>[5]</sup>等,但对无人机编队飞行中的队形变换控制很少涉及。不同的编队队形适用于不同的任务要求和飞行阶段。如执行搜索任务时采用覆盖区域较广的菱形编队,执行空战任务时采用攻击性较强的横一字形编队。因此,无人机编队飞行过程中应该能根据不同的任务要求变换不同的队形。本文结合前述思想,将编队的几何关系引入编队飞行模型,设计了模糊 PID 控制器,实现了编队队形的保持,并能通过控制编队飞机间的几何间距合理变换队形。仿真结果表明了控制的可行性和有效性。

## 1 编队飞行模型推导

以两架无人机左菱形编队飞行为例,其中,带队

的那架无人机称为长机,而其余的称为僚机。长机 L 和僚机 W 都采用相同的一阶航向保持、一阶马赫数(速度)保持和二阶高度保持<sup>[5-7]</sup>组成的自动驾驶仪模型<sup>[4]</sup>,即

$$\dot{V}_i = -\frac{1}{\tau_v}V_i + \frac{1}{\tau_v}V_{ic} \quad (1)$$

$$\dot{\psi}_i = -\frac{1}{\tau_\psi}\psi_i + \frac{1}{\tau_\psi}\psi_{ic} \quad (2)$$

$$\dot{h}_i = -\left(\frac{1}{\tau_{ha}} + \frac{1}{\tau_{hb}}\right)h_i - \frac{1}{\tau_{ha}\tau_{hb}}h_i + \frac{1}{\tau_{ha}\tau_{hb}}h_{ic} \quad (3)$$

式中  $i = L, W$  分别表示长机和僚机。

根据图 1 所示的两架无人机编队飞行的几何关系图<sup>[5-7]</sup>,结合无人机自动驾驶仪模型,线性化后可

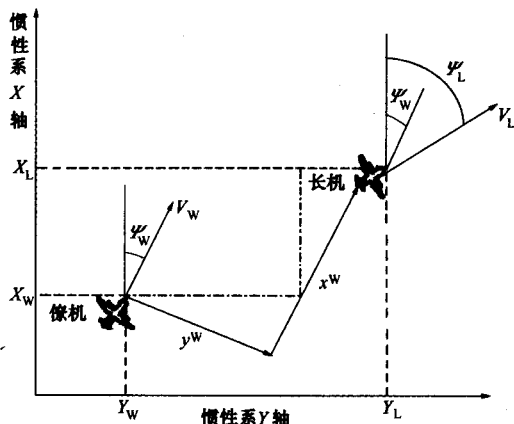


图 1 编队飞行几何关系图

收稿日期:2011-04-06

作者简介:肖亚辉(1962—),西北工业大学研究员,主要从事飞行器控制与仿真的研究。



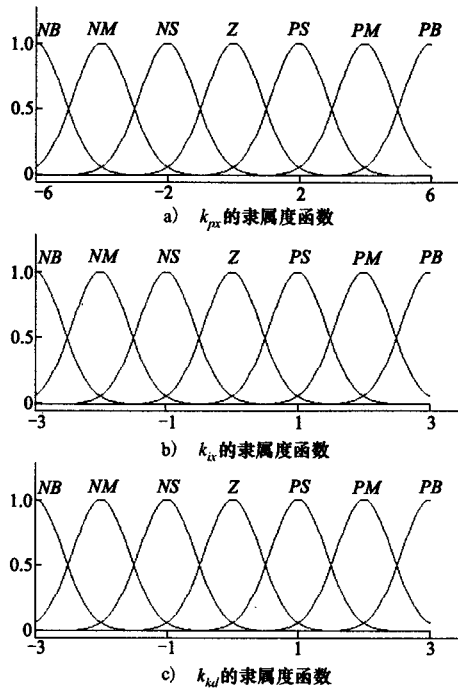


图4 PID参数的隶属度函数

表2  $k_{ix}$ 的模糊控制规则表

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

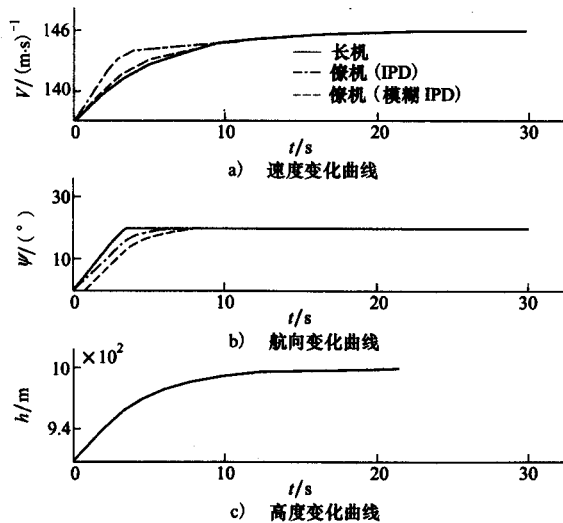


表3  $k_{dx}$ 的模糊控制规则表

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

采用加权平均法进行反模糊化,将模糊推理结果转化为精确值。

$$V_{wc}(t) = k_{px}e_x + k_{ix}\int_0^t e_x dt + k_{dx}e_x \quad (10)$$

$$\psi_{wc}(t) = k_{py}e_y + k_{iy}\int_0^t e_y dt + k_{dy}e_y \quad (11)$$

$$h_{wc}(t) = k_{pz}e_z + k_{iz}\int_0^t e_z dt + k_{dz}e_z \quad (12)$$

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 编队队形保持仿真

取仿真时间60 s,编队时两机处于同一水平面内,航向角 $\psi_0 = 0^\circ$ ,飞行高度为 $h_0 = 914$  m,速度为 $V_0 = 137$  m/s。保持左菱形编队飞行,额定编队间距为: $x_0 = 91$  m, $y_0 = 30$  m, $z_0 = 0$  m。

对长机速度突然速度增加9 m/s,航向偏转 $20^\circ$ ,高度爬升300 m的机动进行仿真。图5前三个图

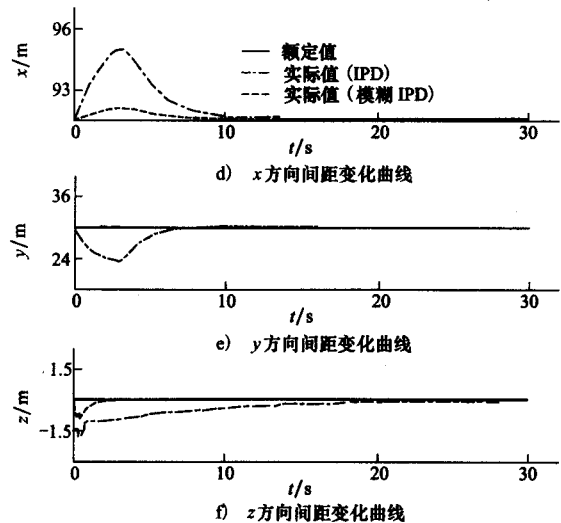


图5 编队队形保持响应曲线

为无人的速度、航向和高度变化曲线,后三个图为长僚机之间的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的间距变化曲线。

由图可知,僚机在 7 s 左右能够跟踪上长机的速度、航向和高度变化,无稳态跟踪误差。两机的编队距离在最初几秒内偏离额定编队间距,但在 10 s 之内都能调整到额定编队间距。与 PID 控制器相比,调节时间短,超调量小。

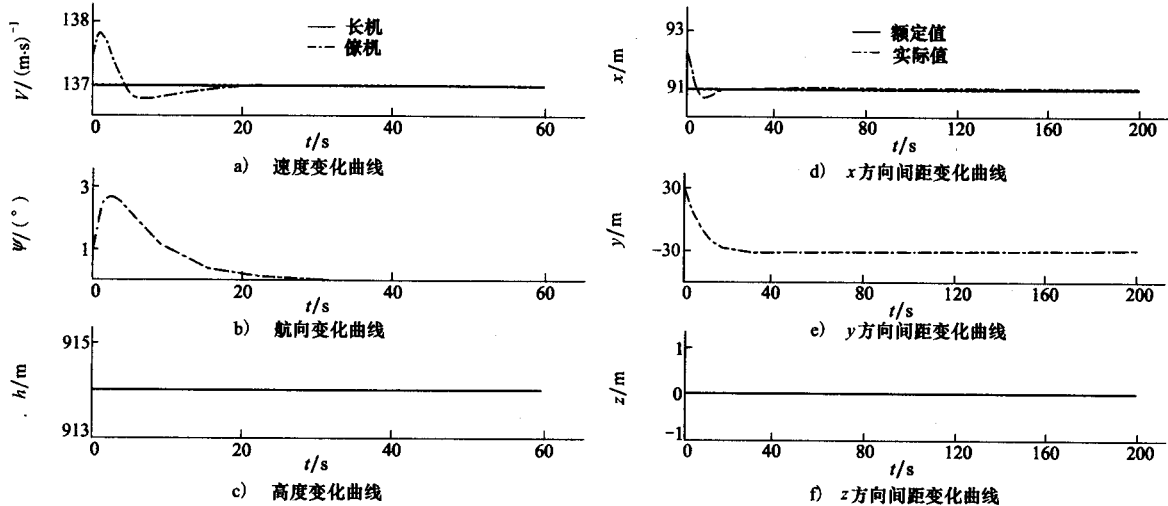


图 6 编队队形变换响应曲线

由图可知,僚机是在前进的同时向右进行队形的变换与调整,速度和航向角都经历了增大到减小最终回到额定值的过程,完成了  $y$  方向间隔的调整,实现了左菱形到右菱形的间隔变换。

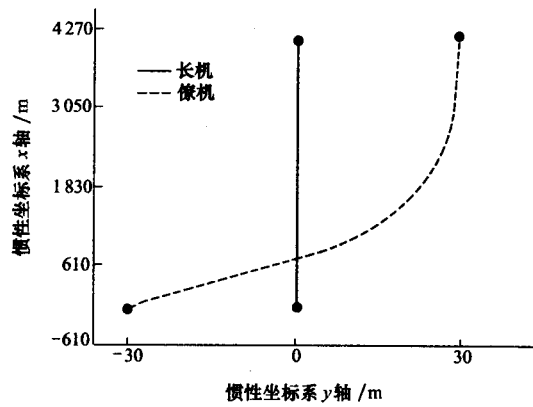


图 7 左菱形变为右菱形的实时轨迹

3.2 编队队形变换仿真

取仿真时间 60 s,初始值同上。要求无人机从左菱形编队飞行变换为右菱形编队飞行,已知右菱形编队的额定间距为  $x_c = 91\text{ m}$ ,  $y_c = -30\text{ m}$ ,  $z_c = 0\text{ m}$ 。将右菱形编队额定间距作为编队间距的控制指令,仿真结果如图 6 所示。

图 7 为长僚机之间的间距变化和实时轨迹,更直观地表明了僚机较好地完成了左菱形到右菱形的队形变换。

4 结 论

本文根据编队飞行的几何关系得出了编队飞行的运动学,设计了模糊 PID 控制系统,能够控制僚机跟踪长机机动保持队形,同时也能通过控制编队间距实现飞行中左菱形到跟随编队以及左菱形到右菱形的队形变换。此外,本文的建模和设计方法具有很好的扩充性,与传统方法相比,调节时间短,超调量小,鲁棒性强,可以用于两架或多架无人机编队飞行的队形保持和变换控制,具有一定参考价值。

## 参考文献:

- [1] 朱战霞,郑莉莉. 无人机编队飞行控制器设计. 飞行力学, 2007, 25(4): 22 ~ 24  
Zhu Zhanxia, Zheng Lili. The Controller Design of UAV Formation Flight. Flight Dynamics, 2007, 25(4): 22 ~ 24 (in Chinese)
- [2] 李文皓,张 珩. 无人机编队飞行技术的研究现状与展望. 飞行力学, 2007, 25(1): 9 ~ 11  
Li Wenhao, Zhang Yan. Reviews on Unmanned Aerial Vehicle Formation - Flight. Flight Dynamics, 2007, 25(1): 9 ~ 11 (in Chinese)
- [3] 刘小雄,武 燕,李广文,章卫国. 双机编队飞行自适应神经网络控制设计与仿真. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7211 ~ 7214  
Liu Xiaoxiong, Wu Yan, Li Guangwen, et al. Adaptive Neural Network Formation Flight Control Design for Two Aircrafts. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7211 ~ 7214 (in Chinese)
- [4] 李文皓,张 珩. 用于多无人机编队飞行的 PIDA + 逆飞行控制器. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6221 ~ 6224  
Li Wenhao, Zhang Yan. PIDA Plus Inversion Flight Controller for Multiple Unmanned Aerial Vehicle Formation. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6221 ~ 6224 (in Chinese)
- [5] Pachter M, Azzo J J D, Dargan J L. Automatic Formation Flight Control. J Guidance, 1994, 17(6): 1380 ~ 1383
- [6] McCamish S, Pachter M, Azzo J J D. Fuzzy Technique Based Close Formation Flight Control. 31st Annual Conference of IEEE, 2005, 40 ~ 44
- [7] Proud Andrew W, Pachter M, Azzo J J D, . Close Formation Flight Control. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit Portland; AIAA, 1999, 1231 ~ 1246

## An Effective Controller Design of Formation Flight of Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

Xiao Yahui, Wang Xinmin, Wang Xiaoyan, Yu Xiang

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

**Abstract:** The introduction of the full paper discusses some relevant matters and then proposes the design mentioned in the title, which we believe is more effective than previous ones and which is explained in sections 1 and 2. Their core consists of: "Considering UAV formation flight in left diamond, we deduce its kinematics equations through the geometry relationships, and combine its linear mathematical model with its autopilot model. Linear mixers are introduced to the velocity, heading and altitude channels. We design the controller based on fuzzy PID technique, which can realize formation changing and holding by controlling the distance." Simulation results, presented in Figs. 5, 6 and 7, show preliminarily that the controller can effectively control UAV formation. This method is proved to have better characteristics than traditional controller in that its overshoot is small, its robustness is high and its response is fast.

**Key words:** algorithms, analysis, control, design, efficiency, errors, fuzzy control, kinematics, membership functions, models, proportional control systems, simulation, unmanned aerial vehicles (UAV); formation flight, fuzzy PID