

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.001

# 基于六轴多旋翼飞行器的赤眼蜂投放系统设计与试验

徐东甫<sup>1,2</sup> 白越<sup>1</sup> 宫勋<sup>1</sup> 续志军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为更好地进行农作物病虫害防治,结合农业无人机和生物防治,设计了一种基于 Hex-Rotor 飞行器的赤眼蜂投放系统,实现赤眼蜂自主投放功能。首先,使用共轴双桨和旋翼系统的倾斜配置,对6轴多旋翼飞行器结构进行了改进,提高了系统的冗余性和可靠性,整个系统满载9 kg,以10 m/s的速度可飞行超过20 min;然后,利用带有扩张状态观测器和快速微分器的反步控制算法,使系统在投放干扰和外部风扰共同作用下,能够很好地完成轨迹跟踪飞行任务。最后,设计了专用的赤眼蜂投放装置,配合GPS和Google earth地图,实现赤眼蜂自主投放功能。在实际试验中,投放系统投放速度超过9 700 m<sup>2</sup>/min,飞行投放覆盖率100%,赤眼蜂孵化率75.81%。试验证明,该系统可以稳定可靠地完成赤眼蜂的投放工作,投放效率和经济效益方面表现良好,可以实现无人机自主生物防治。

**关键词:** 生物防治; 无人飞行器; 赤眼蜂; 自主投放系统

中图分类号: S252+.3; S476+.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)01-0001-07

## Design of Trichogramma Delivering System Based on Hex-Rotor UAV

Xu Dongfu<sup>1,2</sup> Bai Yue<sup>1</sup> Gong Xun<sup>1</sup> Xu Zhijun<sup>1</sup>(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Trichogramma is adopted in biological agriculture because it is environmental friendly and has high efficiency in preventing pests. However, different from traditional liquid pesticides, trichogramma comes in small pill, which is difficult for manual dispensing, especially in Northeast China where corn is the main crop. Based on biological control and agricultural unmanned aerial vehicles (UAV) technology, this article proposed a trichogramma delivering system using Hex-Rotor UAV. The trichogramma autonomous delivery function was achieved through GPS and Google earth map. The Hex-Rotor's basic structure and operating principle were explained, and a special trichogramma delivering device was designed. The entire system weighs 9 kg at full load, and the UAV can fly for more than 20 min at the speed of 10 m/s, complete serving an area of over 10 hm<sup>2</sup> on a single flight. A back-stepping control algorithm with extended state observer (ESO) and fast differentiator was adopted, and the UAV can finish the trajectory tracking flight against external interference winds. Finally, the unit operation area of the delivery system reached 9 700 m<sup>2</sup>/min in practical tests. The trichogramma coverage was estimated almost 100% under ideal conditions, and work omission was 0. Experiments prove that this trichogramma delivering system possesses high stability and reliability, and can realize UAV autonomous biological control.

**Key words:** biological control; unmanned aerial vehicles; trichogramma; autonomous delivery system

收稿日期: 2015-06-30 修回日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372309.61304017)、吉林省科技发展计划重点项目(20150204074GX)、省院合作科技专项资金项目(2014SYHZ0004)和中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-EW-ST5-068)

作者简介: 徐东甫(1987—),男,博士生,主要从事农业航空应用技术研究, E-mail: xu.dong.fu@163.com

通信作者: 白越(1979—),男,副研究员,主要从事微小无人飞行器动力学与控制研究, E-mail: baiy@ciomp.ac.cn

### 引言

生物防治是农作物病虫害综合防治的重要内容之一<sup>[1]</sup>,而生物农药则是生物防治中使用最广泛,应用面积最大的措施。当前,人们越来越重视环境、生态和谐与可持续发展,提出了“公共植保,绿色植保”的理念<sup>[2]</sup>,生物农药面临着新的发展机遇。

赤眼蜂是目前最广泛地被用于生产和释放的卵寄生蜂<sup>[3]</sup>。全世界约有20种赤眼蜂被应用于大量繁殖和释放,每年放蜂治虫的面积达3000万公顷以上,主要包括玉米、水稻、甘蔗、棉花、油菜、蔬菜等农作物及一些林木和果树。释放赤眼蜂后一般都能有效地控制害虫危害,取得明显的经济、生态和社会效益。

目前赤眼蜂的应用主要依靠淹没式投放<sup>[3]</sup>,长期以来一直依靠人工在田间步行,释放悬挂蜂卡。此方式效率低,且随着人工费用日益增长,释放成本也越来越高。植株生长后期,其长势很高,特别是用于甘蔗、玉米、林场等的防治,仅靠人力很难进入田间内部悬挂蜂卡,因此还存在释放工作难以进行、释放难以均匀分布等困难。另外,生物防治有很强的时效性,人工防治往往应对不及时。

本文针对上述问题,根据我国北方地势平坦,人均耕地面积大的特点,设计一种基于Hex-Rotor(Hex rotor aircraft)多旋翼飞行器的赤眼蜂投放系统;针对该系统遇到的干扰,提出特有的轨迹控制算法,通过仿真验证该方法的可行性;完成基于GPS导航和Google earth的自主投放试验;最后通过计算实际投放地点和农田位置信息,得出赤眼蜂投放作业覆盖、作业速度等情况,证明系统的稳定性、高效性及经济性。

## 1 投放系统组成

### 1.1 Hex-Rotor 飞行器概述

Hex-Rotor 飞行器是一种电力驱动的多旋翼飞行器<sup>[4]</sup>,其结构如图1所示,6个等长轻质杆围绕飞行器中心点均匀分布,各连杆末端垂直安装2组旋翼驱动单元,沿顺时针方向上旋翼编号为1~6,下旋翼为7~12,其中旋翼1、3、5、8、10、12顺时针旋转,旋翼2、4、6、7、9、11逆时针旋转;旋翼转轴与机体平面呈 $\gamma$ 角( $0 < \gamma < 90^\circ$ ),且相邻的2个旋翼转轴指向相反。

农用无人机作为一种新的农业机械设备,近些年来被广泛研究应用<sup>[5-7]</sup>。Hex-Rotor 无人飞行器的特殊结构,使其拥有一些独特的优点:与固定翼机型相比,Hex-Rotor 无人飞行器可垂直起降,自由悬停,无需固定起飞跑道;与直升机机型相比,Hex-

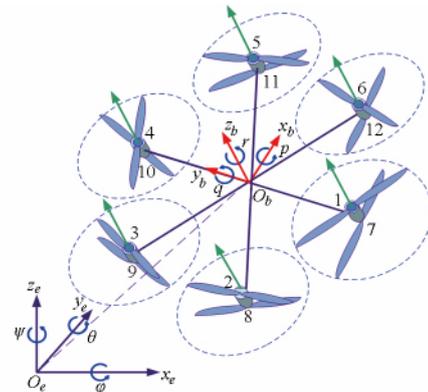


图1 新型 Hex-Rotor 飞行器的结构示意图  
Fig. 1 Diagram of Hex-Rotor aircraft structure

Rotor 无人飞行器无需尾翼调整扭矩,操控简单,效率高;与普通四旋翼、六旋翼飞行器相比,Hex-Rotor 无人飞行器使用共轴双桨和倾斜结构,载质量更大,系统的冗余性、可靠性更高<sup>[8-10]</sup>。

### 1.2 赤眼蜂投放装置

图2为了投放装置的基本结构示意图,装置由控制系统、舵机、投放阀门和赤眼蜂桶组成。投放桶由碳纤维一体化制成,置于无人飞行器的正下方,通过桶边的支架固定在起落架上,其中充满了装有赤眼蜂虫卵的小球,投放桶底装有舵机和投放阀门,控制器通过通信总线从飞行器获取飞行信息,传输PWM信号控制舵机的开关,使阀门开启、闭合,从而控制赤眼蜂的投放速率和投放时机。

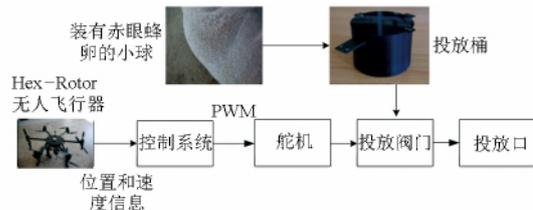


图2 赤眼蜂投放装置结构示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of trichogramma delivering device

Hex-Rotor 多旋翼飞行器的有效载荷空间狭小,载重和航程有限,为尽可能提高施药效率,降低成本,投放装置各部件都进行了优化设计,力求在有限空间内合理安排每个部件的位置,尽可能降低系统质量并运载合适的赤眼蜂卵,提高最终的工作效率。

无人飞行器以10 m/s的飞行速度可连续工作20 min,飞行12000 m,以16 m间隔投放,投放750次,每次投放4 mL,满载荷最大投放量为3 L。设计投放桶的规格为:底面直径165 mm,高度150 mm,容积3 L,此时赤眼蜂卵的剂量既满足工作时长的需求,又不会过重而增加飞行器负荷,降低执行任务的效率。

### 1.3 地面站及无线通信系统

为更好地进行赤眼蜂投放试验,进行数据采集

和效果评测,设计了可视化的地面站软件,如图 3 所示。在实际投放过程中,通过 Google earth 在线地图,对投放地点的地形有更充分了解;配合远距离无线传输装置和 Hex-Rotor 飞行器控制系统,地面站软件可以实时获取飞行器状态信息,并在 Google earth 地图上显示飞行器的飞行轨迹,为飞行器进行超视距飞行提供有力帮助。



图 3 地面站  
Fig. 3 Ground station

采用 900M 型无线电收发模块作为数据传输装置,该模块尺寸为 61 mm × 18.5 mm × 8.2 mm,在 5 V 额定电压工作时,功耗为 3.9 W,它使用调频扩频 (FHSS) 技术,接收灵敏度达 -110 dBm,具有较远的传输距离,户外无遮挡情况下最远可以达到 64 km;工作在 ISM 900M 频段,具有 115.2 kb/s 的数据吞吐量;在其调制解调器中加入了抗干扰技术,这种软/硬件解决方案有效地避免了手机等无线系统的射频干扰,为无人机和地面站控制端提供可靠的远程数据交换,从而可以通过地面站实时获取飞行器的飞行状态,指导投放系统超视距飞行,保证试验的成功进行。

## 2 投放系统飞行轨迹跟踪

### 2.1 轨迹规划

赤眼蜂投放是一个特殊的复合型系统工程,其根本目标是提供高效、快速、大面积的生物农药的投放,以最适量的投入获取最大的经济效益。

作业的重复率与覆盖率是评判作业质量的重要指标,重复率直接影响生产资料消耗和农机作业能耗;覆盖率越高,农田作业机械的作业质量越好。赤眼蜂虫卵价格相对低廉(每公顷成本 30 元),使用无人机能耗较低(电池充满只需 1.2 kW·h),在大规模投放试验中,每公顷投放的总成本不到 45 元。与喷洒农药的作业方式相比,投放赤眼蜂的成本低廉,重复率的负面效果减弱,重要性随之降低。因此,航线规划有其特有的要求<sup>[11-12]</sup>。

将田块 4 个角点的 GPS 坐标进行 Gauss-Kruger

投影变换转换至平面坐标<sup>[13]</sup>,在地图上标记出田块边界。在作业幅宽已知的情况下,根据作业方向解算出理论航迹点坐标,可作为自主飞行的导航数据。飞行的轨迹规划如图 4 所示,假设赤眼蜂孵化后的活动范围为半径为  $r_1$  的红色圆形区域,试验田块为  $a \times b$  的矩形。为保证完全覆盖,则投放间隔和飞行的间距定为  $s_1$ ,且  $s_1 < \sqrt{2}r_1$ ,以“之”字型往返完成投放任务<sup>[14]</sup>,其中第 1 个投放点,距离田边距离要小于  $\sqrt{2}r_1/2$ ,此时理论上可以对田块进行全覆盖。

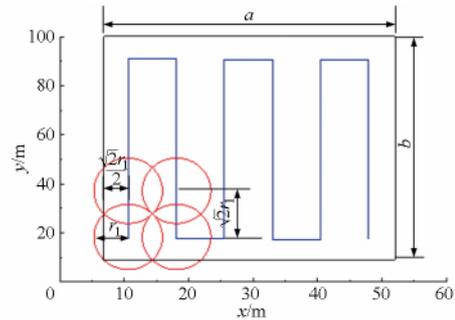


图 4 轨迹规划示意图

Fig. 4 Schemes of orbital trajectory planning

### 2.2 轨迹跟踪方法

飞行器轨迹跟踪分为姿态增稳控制和平动位置控制<sup>[15]</sup>。其中,姿态增稳控制器利用飞行器的姿态信息与期望的姿态指令确定控制力矩;平动控制器利用位置与速度的信号并结合姿态信息计算旋翼需要提供的合力。构建如图 5 所示的闭环飞行轨迹控制系统。

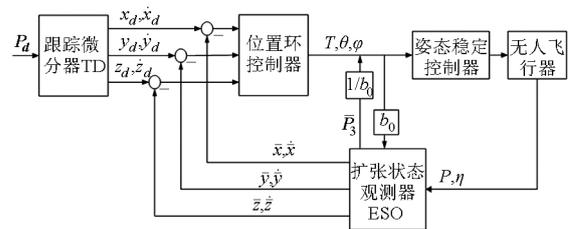


图 5 飞行器轨迹跟踪控制框图

Fig. 5 Aircraft trajectory tracking control

控制系统包括 3 部分:跟踪微分(Tracking differentiator,TD)、扩张状态观测器(Extended state observer,ESO)和位置环反步控制算法。

首先引入一个跟踪微分器单元,跟踪参考轨迹信号  $P_d$ ,并安排预期的动态跟踪特性。其主要作用在于柔化  $P_d$  的变化,以减少系统输出的超调,增强控制器的鲁棒性。在这里基于二阶最速开关系统,可以得到二阶跟踪微分器

$$\begin{cases} \dot{P}_d^1 = P_d^2 \\ \dot{P}_d^2 = -R \text{sat}(P_d^1 - P_d(t) + \|P_d^2\|^2 R^{-1}/2 \delta) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $P_d^1 = [z_d \ x_d \ y_d]^T$ ,  $P_d^2 = [\dot{z}_d \ \dot{x}_d \ \dot{y}_d]^T$  表示对参考轨迹  $P_d$  及其微分  $\dot{P}_d$  的逼近,  $R$  表示逼近收敛的速度, 线性饱和函数  $\text{sat}(A \ \delta)$  可表示为

$$\text{sat}(A \ \delta) = \begin{cases} \text{sign}(A) & (|A| > \delta) \\ A/\delta & (|A| \leq \delta, \delta > 0) \end{cases}$$

当整个系统工作时, 赤眼蜂卵的不断投放会对飞行系统造成一个不可忽略的扰动, 该扰动和外界的扰动(如风扰)一起, 对控制系统造成不利影响, 为解决这个问题, 建立了一个扩张状态观测器(ESO)环节, 实时观测扰动, 并对扰动进行补偿。ESO 可表示为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \bar{\boldsymbol{P}}_1 - \boldsymbol{P} \\ \dot{\boldsymbol{P}}_1 = \dot{\boldsymbol{P}}_2 - \boldsymbol{\beta}_1 \boldsymbol{\varepsilon} \\ \dot{\boldsymbol{P}}_2 = \dot{\boldsymbol{P}}_3 - \boldsymbol{\beta}_2 \text{fal}(\boldsymbol{\varepsilon} \ \alpha_1 \ \delta) + \boldsymbol{R} \boldsymbol{T} - \boldsymbol{g} \\ \dot{\boldsymbol{P}}_3 = -\boldsymbol{\beta}_3 \text{fal}(\boldsymbol{\varepsilon} \ \alpha_2 \ \delta) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\bar{\boldsymbol{P}}_1 = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]^T$ ,  $\bar{\boldsymbol{P}}_2 = [\dot{\bar{x}} \ \dot{\bar{y}} \ \dot{\bar{z}}]^T$  是对飞行器位置和速度的估计值,  $\bar{\boldsymbol{P}}_3$  为对外界环境和赤眼蜂投放对系统的总干扰,  $\boldsymbol{T}$  为飞行器各执行单元在机体上产生的升力,  $\boldsymbol{g}$  为重力加速度,  $\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, \boldsymbol{\beta}_3$  为正定的对角矩阵,  $\text{fal}(\cdot)$  函数为

$$\text{fal}(\boldsymbol{\varepsilon} \ \alpha \ \delta) = \begin{cases} |\boldsymbol{\varepsilon}| \text{sign}(\boldsymbol{\varepsilon}) & (|\boldsymbol{\varepsilon}| > \delta) \\ \boldsymbol{\varepsilon} / \delta^{1-\alpha} & (|\boldsymbol{\varepsilon}| \leq \delta) \end{cases}$$

飞行器的动力学方程满足

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{P}} = \hat{\boldsymbol{P}} \\ \ddot{\boldsymbol{P}} = \begin{bmatrix} -g + u_z T/m \\ u_x T/m \\ u_y T/m \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} u_z &= \cos\varphi \cos\theta \frac{T}{m} \\ u_x &= \cos\varphi \sin\theta \cos\psi + \sin\varphi \sin\psi \\ u_y &= \cos\varphi \sin\theta \sin\psi - \sin\varphi \cos\psi \end{aligned}$$

可采用反步控制算法设计姿态控制器

$$\boldsymbol{E}_1 = \boldsymbol{P}_d^1 - \bar{\boldsymbol{P}}_1 \quad (4)$$

对式(4)求导得到  $\dot{\boldsymbol{E}}_1 = \dot{\boldsymbol{P}}_d^1 - \dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_1$ , 其中  $\dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_1$  为虚拟控制量。设 Lyapunov 函数

$$\begin{cases} V_1 = \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{E}_1 / 2 \\ \dot{V}_1 = \dot{\boldsymbol{E}}_1^T \boldsymbol{E}_1 = (\dot{\boldsymbol{P}}_d^1 - \dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_1)^T \boldsymbol{E}_1 \end{cases} \quad (5)$$

令  $\dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_1^T = \dot{\boldsymbol{P}}_d^{1T} + \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A}$ , 其中  $\boldsymbol{A} = \text{diag}(a_1, b_1, c_1)$

( $a_1, b_1, c_1 > 0$ ),  $\dot{V}_1 = -\boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A} \boldsymbol{E}_1 < 0$ , 所以式(3)的第1式稳定。于是有

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_2 = \hat{\boldsymbol{P}} - \bar{\boldsymbol{P}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{E}}_2^T = \dot{\boldsymbol{P}}_d^T + \boldsymbol{E}_1^T - \dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_2^T \end{cases} \quad (6)$$

设 Lyapunov 函数

$$\begin{cases} V_2 = \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{E}_1 / 2 + \boldsymbol{E}_2^T \boldsymbol{E}_2 / 2 \\ \dot{V}_2 = (\boldsymbol{E}_2^T - \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A}) \boldsymbol{E}_1 + [(\boldsymbol{E}_2^T - \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A}) \boldsymbol{A} - \dot{\bar{\boldsymbol{P}}}_2^T] \boldsymbol{E}_2 \\ \ddot{\bar{\boldsymbol{P}}}_2^T = (\boldsymbol{E}_2^T - \boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A}_1) \boldsymbol{A}_1 + \boldsymbol{E}_2^T \boldsymbol{A}_2 + \boldsymbol{E}_1^T \\ \dot{V}_2 = -\boldsymbol{E}_1^T \boldsymbol{A}_1 \boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2^T \boldsymbol{A}_2 \boldsymbol{E}_2 < 0 \end{cases} \quad (7)$$

即式(7)可以使系统式(3)稳定。由式(3)第2式得

$$\begin{bmatrix} T \\ u_x T \\ u_y T \end{bmatrix} = \left( \ddot{\bar{\boldsymbol{P}}} + \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} m / (\cos\varphi \cos\theta) \\ m \\ m \end{bmatrix}$$

解得

$$\begin{cases} T = \frac{m}{\cos\varphi \cos\theta} [a_1(\dot{e}_z - a_1 e_z) + a_2 \dot{e}_z + e_z + g] \\ u_x = \frac{m}{T} [b_1(\dot{e}_x - b_1 e_x) + b_2 \dot{e}_x + e_x] \\ u_y = \frac{m}{T} [c_1(\dot{e}_y - c_1 e_y) + c_2 \dot{e}_y + e_y] \end{cases}$$

解算出飞行器跟踪水平方向运动期望轨迹所需要的滚转角  $\varphi_d$  和俯仰角  $\theta_d$  分别为

$$\begin{cases} \varphi_d = \arctan \frac{u_x \sin\psi - u_y \cos\psi}{(1 - u_x^2 \sin^2\psi + 2u_x u_y \cos\psi \sin\psi - u_y^2)^{\frac{1}{2}}} \\ \theta_d = \arctan \frac{u_x \cos\psi + u_y \sin\psi}{(1 - u_x^2 \sin^2\psi + 2u_x u_y \cos\psi \sin\psi - u_y^2)^{\frac{1}{2}}} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.3 数字仿真结果

为验证本文提出的轨迹控制方法的有效性, 以 Hex-Rotor 飞行器原型机为对象, 在 Matlab 环境中进行仿真。选用原型机的真实数据作为仿真的参数, 原型机的数据参数如表1所示。

表1 飞行器数据

Tab.1 Data of aircraft

参数	数值
空载质量/kg	8
满载质量/kg	9
飞机臂长/m	0.45
x轴方向转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.363
y轴方向转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.363
z轴方向转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.651
升力因子	$1.91 \times 10^{-3}$

其中飞行器的初始参数为:  $\boldsymbol{P}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $[\varphi \ \theta \ \psi]^T = [0 \ 0 \ 0.2 \text{ rad}]^T$ , 在3个方向上取

白噪声  $\Delta F = [\Delta F_x \quad \Delta F_y \quad \Delta F_z]$  为输入扰动力, 其中噪声的幅值  $\|\Delta F_x\| \leq 10 \text{ N}$ ,  $\|\Delta F_y\| \leq 10 \text{ N}$ ,

$\|\Delta F_z\| \leq 10 \text{ N}$ 。模拟实际作业时的飞行路线, 仿真结果如图 6、7 所示。

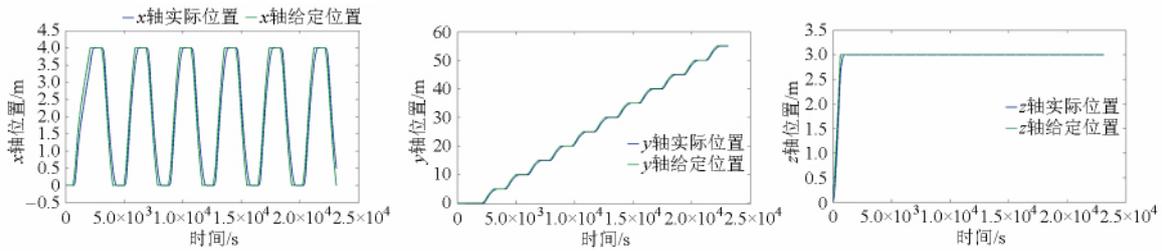


图 6 x、y、z 轴期望轨迹和实际跟踪轨迹

Fig. 6 Desired and actual tracking trajectory of x, y, z axes

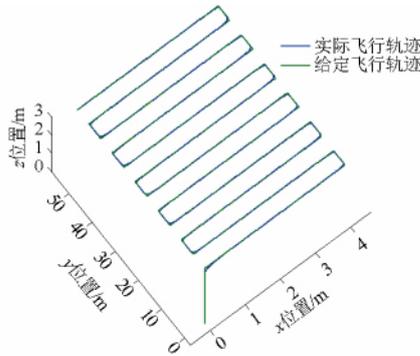


图 7 期望轨迹和实际跟踪轨迹三维图

Fig. 7 Three-dimensional figure of desired trajectory and actual tracking trajectory

从仿真结果可以看出, 基于反步控制器, 利用扩张状态观测器实时观测并补偿扰动, 飞行系统的姿态角能在很短时间内达到跟踪位置控制环节解算出的期望姿态角, 并且能够很好地抵抗扰动, 快速达到期望位置, 满足投放系统对给定轨迹精准跟踪的要求。

### 3 实际应用试验

#### 3.1 试验场地与实际投放试验

试验场地为位于内蒙古自治区呼伦贝尔市海拉尔某农场(49.28°N, 120.81°E)的一块约 106 m × 310 m 近似菱形的油菜田。实地考察得出 Google earth 的最新地图的有效性; 通过单次投放剂量的赤眼蜂孵化后活动范围, 计算出投放间隔(16 m), 从而得出最佳的投放路线; 将路线图输入地面站, 飞行高度定为 10 m, 定飞行速度 10 m/s 执行投放任务; 同时, 飞行系统回传的数据频率设置为 10 Hz, 将飞行器的实时飞行高度 h、飞行速度 v、航向  $\psi$  传回地面站数据库, 以便于进行后期的投放效果评估。飞行轨迹和规划轨迹对比结果如图 8 所示。

图中红色曲线为给定飞行轨迹, 蓝色曲线为实际飞行轨迹。对飞行轨迹的分析如下: 飞行实际轨迹基本符合规划, 但是为保证高效投放, 当无人飞行器高速飞行时, 加大了飞行系统的控制难度, 在弯角



图 8 实际飞行轨迹和规划轨迹对比图

Fig. 8 Contrast figure of actual flight trajectory and planning trajectory

处出现了超调; 当地磁场环境较为复杂, 无人飞行器在执行任务时, 磁罗盘会受到影响, 导致偏航角偏差, 轨迹跟踪效果下降; GPS 的精度有限(圆概率误差为 2 m), 对自主飞行造成不良影响, 使用差分 GPS 或者双天线 GPS 可以有效提高导航精度<sup>[17]</sup>。

实际飞行轨迹和规划轨迹的偏差平均 2 m, 最大偏差接近 3 m。由图 4 可得, 偏差不超过  $r_1/2$ , 即不超过 8 m, 飞行投放覆盖率依然可以达到 100%, 满足投放全覆盖的使用要求。

#### 3.2 投放效果分析

对不同的农艺, 作业质量评价指标也不同, 对油菜的赤眼蜂投放系统而言, 投放的覆盖率和整个投放系统的单位时间作业面积, 会直接影响到作业效果。

为检验自主模式下的赤眼蜂投放系统的作业效果和质量, 假设赤眼蜂卵质量均匀, 孵化率理想, 且不考虑气流造成的投放偏差, 赤眼蜂卵的实际投放地点满足公式

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2h}{g}} vm \quad (9)$$

式中  $x_2, y_2$ ——飞行器投放赤眼蜂的位置

$x_1, y_1$ ——赤眼蜂卵掉落的位置

$g$ ——当地的重力加速度

$m$ ——单次投放的质量

根据实际作业航线和传回的实际飞行数据得到

赤眼蜂投放点 如图9所示。

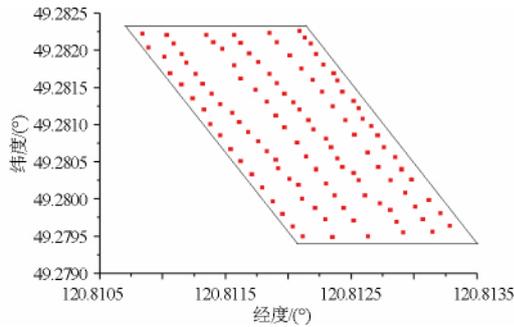


图9 赤眼蜂投放点

Fig.9 Points of trichogramma

根据前期试验,每次投放的赤眼蜂卵的有效范围为半径12 m的圆形区域,面积约为452 m<sup>2</sup>。投放赤眼蜂的有效覆盖图如图10所示。

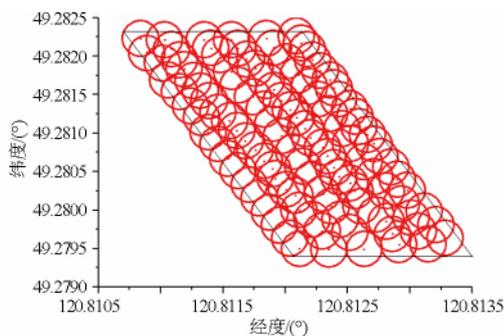


图10 赤眼蜂投放有效覆盖范围

Fig.10 Trichogramma on effective range

后期进行了3次田间孵化率调查,结果分别为77.57%、72.95%、76.92%,平均孵化率为75.81%。对该次飞行作业的投放面积、覆盖面积及

单位时间投放面积等评价指标做简单的估算<sup>[18]</sup>,统计结果如表2所示。

表2 赤眼蜂投放系统相关参数估计

Tab.2 Related parameter estimation in flying operation

参数	数值
试验田总面积/m <sup>2</sup>	31 000
投放覆盖面积/m <sup>2</sup>	接近 31 000
投放遗漏面积/m <sup>2</sup>	0
覆盖率/%	100
平均孵化率/%	75.81
投放时间/s	190
单位时间投放面积/(m <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	9 700

## 4 结论

(1) 基于 Hex-Rotor 无人飞行器的赤眼蜂投放系统是生物防治和农业无人机的有机结合,是现有农业技术的一种有效补充方法,在虫害较单一,且需要大面积投放的北方地区,有其实际应用价值。

(2) Hex-Rotor 可以很好地抵抗投放动作带来的干扰和外部风扰,基于 GPS 和 Google earth 地图,可以快速、准确地按指令执行预计的轨迹跟踪飞行任务。

(3) 基于 Hex-Rotor 无人飞行器的赤眼蜂投放系统在实际试验中,190 s 内投放接近 31 000 m<sup>2</sup>,单位时间投放面积达到 9 700 m<sup>2</sup>/min,且飞行投放覆盖率基本达到 100%,平均孵化率达到 75.81%,可以实现无人机自主生物防治。

## 参 考 文 献

- 肖英方,毛润乾,万方浩. 害虫生物防治新概念——生物防治植物及创新研究[J]. 中国生物防治学报,2013 29(1): 1-10.  
Xiao Yingfang, Mao Runqian, Wan Fanghao. New concept of biological control: Bio-control plants used for management of arthropod pests[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2013 29(1): 1-10. (in Chinese)
- 夏敬源. 公共植保·绿色植保的发展与展望[J]. 农业技术与装备, 2011(10): 4-7.
- 于春香. 人工释放赤眼蜂防治玉米螟[J]. 现代农业, 2013(2): 26.
- 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.  
Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53-59. (in Chinese)
- 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194-201.  
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194-201. (in Chinese)
- Peter V B. RPAS (remotely piloted aircraft systems) yearbook 2013: The Global Perspective [M]. 11th ed. Paris, France: Blyenburgh & Co, 2013.
- Fritz B K, Kirk I W, Hoffmann W C, et al. Aerial application methods for increasing spray deposition on wheat heads [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006 22(3): 357-364.
- 汪沛,胡炼,周志艳,等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013 29(3): 54-61.  
Wang Pei, Hu Lian, Zhou Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 54-61. (in Chinese)
- 茹煜,贾志成,范庆妮,等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012 43(6): 47-52.  
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47-52. (in Chinese)

- 10 赵常均,白越,宫勋 等. 气动干扰下的 Hex-Rotor 无人飞行器控制器及其飞行实验 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1088 - 1095.  
Zhao Changjun, Bai Yue, Gong Xun, et al. Hex-rotor unmanned aerial vehicle controller and its flight experiment under aerodynamic disturbance [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 1088 - 1095. ( in Chinese)
- 11 卢之慧,沈明霞,姬长英. 嵌入式 GPS 技术的农用飞机作业航线及边界规划研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8): 3819 - 3820.  
Lu Zhihui, Shen Mingxia, Ji Changying. Channel planning and border algorithm in agricultural aircraft operating based on embedded and GPS technology [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(8): 3819 - 3820. ( in Chinese)
- 12 杨成顺,杨忠,许德智,等. 新型六旋翼飞行器的轨迹跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(10): 2098 - 2105.  
Yang Chengshun, Yang Zhong, Xu Dezhi, et al. Trajectory tracking control for novel six-rotor aircraft [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(10): 2098 - 2105. ( in Chinese)
- 13 李继宇,张铁民,彭孝东,等. 四旋翼飞行器农田位置信息采集平台设计与实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 202 - 206.  
Li Jiyu, Zhang Tiemin, Peng Xiaodong, et al. The fieldlocation information collection platform design based on the Four-rotor Aircraft [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 202 - 206. ( in Chinese)
- 14 彭孝东,张铁民,李继宇,等. 基于目视遥控的无人机直线飞行与航线作业试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 258 - 263.  
Peng Xiaodong, Zhang Tiemin, Li Jiyu, et al. Experiment of straight and airline flight operation of farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2014 45(11): 258 - 263. ( in Chinese)
- 15 宫勋,白越,赵常均,等. 新型 Hex-Rotor 无人飞行器及其飞行控制系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 1995 - 2002.  
Gong Xun, Bai Yue, Zhao Changjun, et al. Novel Hex-Rotor aircraft and its autonomous flight control system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 1995 - 2002. ( in Chinese)
- 16 周黎妮,唐国金,李海阳. 航天器姿态机动的自抗扰控制器设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(12): 2122 - 2126.  
Zhou Lini, Tang Guojin, Li Haiyang. Active disturbance rejectioncontroller design for spacecraft attitude maneuver [J]. Systems Engineering and Electronics 2007 29(12): 2122 - 2126. ( in Chinese)
- 17 熊迎军,沈明霞,张祥甫,等. 农用飞机防治病虫害作业导航系统设计与地面模拟测试 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 153 - 156, 146.  
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Zhang Xiangfu, et al. Navigation system for preventing pests and diseases using agricultural aircraft [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 153 - 156, 146. ( in Chinese)
- 18 刘卉,孟志军,付卫强. 基于 GPS 轨迹的农机垄间作业重叠与遗漏评价 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 149 - 154.  
Liu Hui, Meng Zhijun, Fu Weiqiang. Overlap and skip evaluation for agricultural machinery operation based on GPS track logs [J]. Transactions of the CSAE 2012 28(18): 149 - 154. ( in Chinese)