

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-12

微小型无人机室内目标自主搜索方案研究

唐东洋¹, 韩庆¹, 田科源², 刘星¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 上海航天技术研究院 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 在室内环境条件下,无人机的系统功耗和平台质量将受到限制,为了实现无人机对室内特定目标的搜寻任务,提出一种低成本、低功耗、小尺寸无人机自主搜寻室内目标的设计方案。首先,根据约束条件选择合适的无人机硬件架构,通过饱和控制的方式设计无人机的控制器;其次,利用三个 TF-Luna 激光传感器构成简易的传感器组合获取环境信息,并在避障算法的设计中参考 BUG 算法的避障逻辑,完成无人机自主巡航模式设计;而后,通过图像采集芯片实时获取无人机飞行方向的图像信息,使用集成 YOLO-v2 算法的芯片检测图像中的目标信息;最后,采用中心区域跟随策略实现对目标的实时跟随。在 6 m×6 m 的 Simulink 仿真环境和现实场景中以 0.5 m/s 的速度完成自主巡航与目标检测跟踪任务的仿真与实际飞行,证明了所提设计方案的可行性。

关键词: 室内环境;自主导航;YOLO;BUG 算法;微小型无人机

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research on autonomous indoor target search solution for MAVs

TANG Dongyang¹, HAN Qing¹, TIAN Keyuan², LIU Xing¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Shanghai Electro-mechanical Engineering Institute, Shanghai Academy of
Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: To accomplish the task of searching for specific indoor targets with a drone, even when system power consumption and platform weight are constrained, a low-cost, low-power, small-size drone design for autonomous indoor target search is proposed. Firstly, a suitable UAV hardware architecture based on constraints is chosen, and the controller is designed using saturation control. Besides, a simple sensor combination comprising three TF-Luna laser sensors is employed to gather environmental information. In the obstacle avoidance algorithm design, the avoidance logic of the Bug algorithm is referenced, achieving the design of the UAV's autonomous cruising mode. Then, the image acquisition chip is used to obtain real-time image information in the drone's flight direction. The chip integrated with the YOLO-v2 algorithm detects target information in the images. Furthermore, a central region following strategy is employed to achieve real-time tracking of the target. Finally, the simulation and actual flight of the autonomous cruise and target detection tracking tasks were completed at a speed of 0.5 m/s in a 6 m x 6 m Simulink simulation environment and real-world scenarios.

Key words: indoor environment; autonomous navigation; YOLO; Bug algorithm; MAV

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-08-19

基金项目: JKW 项目(06010-5120210346)

通信作者: 唐东洋(2000-), 男, 硕士研究生。E-mail: TDoYaNG@126.com

引用格式: 唐东洋, 韩庆, 田科源, 等. 微小型无人机室内目标自主搜索方案研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-12.

TANG Dongyang, HAN Qing, TIAN Keyuan, et al. Research on autonomous indoor target search solution for MAVs[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-12. (in Chinese)

0 引言

近些年随着无人机行业的高速发展,各种类型的无人机被广泛应用于航拍摄影、工业巡检、灾情救急和侦察打击等领域。在全球定位系统的辅助下,无人机的操作简单易行,也可以根据预先设定的流程自主飞行,无人机在一般环境下的自主控制技术已经较为成熟。但是在工业、军事领域某些环境的应用中,如城市街巷、地震后倒塌的房屋中、地磁信号复杂的丛林等,无人机受到工作空间、信号强度与处理速度等的极大限制,因此需要一种能够在受限环境中(后文统一以室内环境表示)实现相应任务的低功耗、小尺寸的无人机。

国内外对于无人机在受限环境下自主飞行的研究大多数基于即时定位与地图构建算法。Shen Shaojie 等^[1]利用激光雷达来获取无人机周围环境信息,使用 ICP 算法得到无人机的定位数据,通过增量 SLAM 算法和滤波器对数据进行校正和融合,从而得到无人机在地球坐标系下的相关信息以实现室内自主飞行;Grzonka 等^[2]通过粒子滤波算法对机载激光雷达的扫描云图进行迭代求解,得到更加精确的地图并应用于 SLAM 方法;Sun Jiabi 等^[3]提出 LSD-SLAM 算法对无人机轨迹进行实时估计并重建其周围的半密集环境;Mur-artal 等^[4]基于 ORB 特征提取算法提出 ORB-SLAM 算法,利用视觉里程计跟踪未映射区域并与地图点匹配,通过对视觉传感器立体观测束调整,进行精确的轨迹估计;张博翰等^[5]通过双目视觉传感器获取无人机周围的三维信息,实现未知环境中的自主飞行。路径规划作为无人机执行任务的基础,需要通过各种方法得到规划起始位置和目标位置之间的最优路径^[6]。肖薜等^[7]在虚拟弹簧模型中引入边界力概念,解决无人机通过狭窄通道易振荡及目标不可达的问题;辛建霖等^[8]引入 Dijkstra、Logistic 混沌映射、模拟退火等方法改进了蚁群算法,提高了复杂环境中路径搜索的效率与性能。

考虑自主控制的实现过程,实现无人机室内自主功能至少需要包括任务规划、环境感知与定位、路径规划和底层飞行控制四个功能模块。以上关于无人机室内全自主导航的研究主要聚焦于环境感知与定位,而目前主流的环境感知与定位方法是借助于视觉传感器的深度摄像头^[9]、激光雷达^[10]及其组合来完成。但是使用该方法也就意味

着无人机平台需要搭载相应的深度摄像头/激光雷达等传感器,从而显著增加系统功耗、增加平台尺寸,从另一个角度限制无人机的使用环境。同时,处理环境信息与实时路径规划还需要使用机载计算机,使得该方案在实际工程应用中受到较大限制。

因此,本文从低成本、低功耗和小尺寸角度出发,提出一种新的无人机室内自主控制方案,并在仿真环境与实际场景中对其自主功能进行验证。

1 控制系统设计

综合考虑美国国防高级研究计划局(DARPA)对微型飞行器的定义^[11]以及文献[12-14]中提到的无人机分类方法,本文认为适用于室内环境的微小型无人机起飞质量应为 100~400 g,航程不小于 800 m,空载续航时间为 15~45 min。

在上述指标的限定下,为了实现自主控制,本文分别从底层和顶层对飞控系统进行设计,确保无人机具有基本的飞行和自主搜寻的能力。

1.1 底层飞控系统的设计

底层飞控系统设计的主要目标是使无人机具备基本飞行能力的同时系统尽可能的轻量化。本文将整个系统按照模块化设计的思路分成诸多模块,对市面上容易获取的各种型号的零部件进行比较,从中选择符合设计思路的硬件,各模块如图 1 所示。

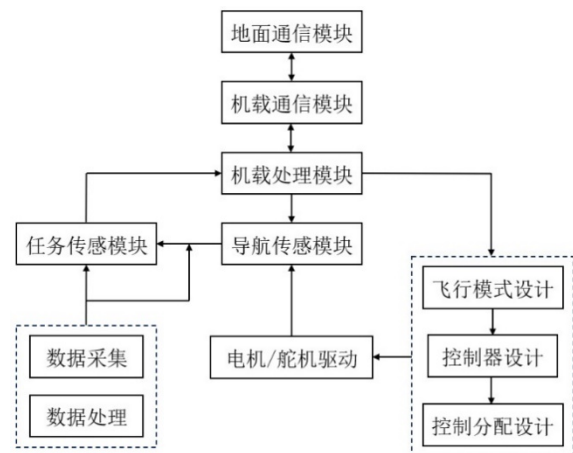


图1 底层飞控系统设计方案图

Fig. 1 Design diagram of the low-level flight control system

1.2 基础模块硬件选型

经过比较与选型,得到符合条件的各模块硬件型号、质量以及尺寸如表1所示。

表1 组件参数表
Table 1 Component parameter list

模块	硬件型号	质量/g	尺寸/mm
机载处理	STM32H743	0.7	8×8
导航传感	MPU6000	1.1	4×4
通信	遥控	ELRS Nano	0.7
	图传	AVATAR	20
任务	高度	TF-Luna	4.6
	速度	PX4FLOW	14

1) 机载处理模块

选择STM32H743芯片作为机载处理模块的主要原因是其工作主频高,可达400 Hz,同时尺寸、质量等较为符合设计思想。

2) 导航传感模块

导航传感模块考虑到室内环境全球定位系统的测量数据可靠性低,而微小型四旋翼工作时由于自身尺寸的原因,周围的电磁环境也不稳定,航姿测量系统的精度会受到较大影响,所以该模块工作主要依赖惯性测量元件MPU6000。

3) 机载通信模块

指令数据的通信频率采用915 MHz而不是2.4 GHz^[15]是保证由室外环境进入室内环境的过渡阶段通信的稳定性。而图像数据传输是考虑到该型无人机的工作半径不小于800 m,需要具有视距外操作能力,因此添加图像传输模块。

4) 任务传感模块

无人机在室内飞行时由于受到制造工艺、气动环境和控制精度的影响,在垂直方向和水平方向上会发生漂移。通过高度传感器和水平方向上的速度传感器获取对应的估计信息以消除漂移。由于室内复杂的环境,气压计和超声测距仪都不适用^[16],所以选择TF-Luna激光测距仪作为高度传感器。

由于硬件限制,无人机室内定位常用的激光雷达定位、视觉传感器定位以及基于信标的UWB定位都无法实现,故综合考虑采用PX4FLOW光流传感器为主,惯性传感器为辅,获取无人机水平

速度估计,实现室内环境微小型四旋翼定点功能。

1.3 控制器设计

在室内环境执行任务时除了需要对无人机姿态执行反馈保持稳定外,有时还需要对其位置信息进行反馈控制,故设计了增稳模式、定高模式和定点模式三种飞行模式以适应任务过程中不同阶段的需要。

增稳模式为无人机最基本的飞行模式,该模式下由飞控系统解算四旋翼姿态并结合遥控信号叠加得到总控制量。定高模式是在增稳模式的基础上添加了对高度通道的稳定控制。定点模式则是在定高模式的基础上增加无人机水平速度通道的稳定控制。具体控制流程如图2所示。

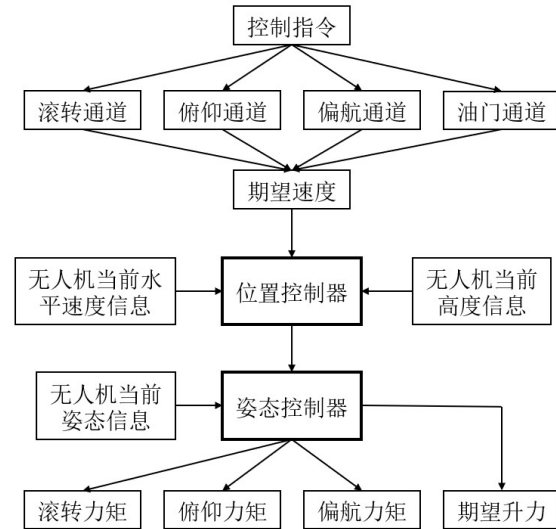


图2 定点模式控制流程图

Fig. 2 Control flowchart of the hover mode

增稳模式和定高模式流程图与图2类似,未使用的控制通路增益为0。图中的姿态控制器和位置控制器由多级PID控制器来建立各误差量与力矩之间的数学模型^[17],即:

$$\ddot{s} = k_p(s - s_e) + k_i \int (s - s_e) dt + k_d \frac{d(s - s_e)}{dt} \quad (1)$$

式中: s 为实际位置或角度; s_e 为预期位置或角度; k_p 、 k_i 、 k_d 为比例、积分和微分环节的参数。

姿态控制器可由下式表示:

$$\begin{cases} e_w = w - w_d \\ \tau_w = -K_{wp}e_w - K_{wi} \int e_w - K_{wd} \frac{de_w}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $w = [p \ q \ r]^T$, $w_d = [p_d \ q_d \ r_d]^T$ 分别为实际角度与期望角度。

但是实际应用过程中, 由于环境因素的影响, e_w 的值可能很大, 得到超出四旋翼执行能力的期望力矩 τ_d 。因此定义一个饱和函数如下:

$$\text{sat}_{gd}(v, w) = \begin{cases} v, & \|v\|_{\infty} \leq w \\ w \frac{v}{\|v\|_{\infty}}, & \|v\|_{\infty} > w \end{cases} \quad (3)$$

代入得到带饱和的姿态控制器如下:

$$\begin{cases} e_w = \text{sat}_{gd}(w - w_d, e_{w \max}) \\ \tau_w = \text{sat}_{gd}(-K_{wp}e_w - K_{wi} \int e_w - K_{wd} \frac{de_w}{dt}, \tau_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2} d_1 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_2 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_3 C_T & \frac{\sqrt{2}}{2} d_4 C_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2} d_1 C_T & \frac{\sqrt{2}}{2} d_2 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_3 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_4 C_T \\ c_M & c_M & c_M & c_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: f 为旋翼产生的总拉力; τ_x 、 τ_y 、 τ_z 分别为在机头方向、测向和垂向上的分力矩, 即横滚力矩、俯仰力矩和偏航力矩; d_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为第 i 个电机与机体之间的距离; ω_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为第 i 个旋翼的转速; D_p 为螺旋桨直径; ρ 为环境空气密度;

$$C_4 = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2} d_1 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_2 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_3 C_T & \frac{\sqrt{2}}{2} d_4 C_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2} d_1 C_T & \frac{\sqrt{2}}{2} d_2 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_3 C_T & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_4 C_T \\ c_M & -c_M & c_M & -c_M \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

1.4 顶层飞控系统设计

底层飞控设计保证微小型四旋翼无人机能够稳定飞行, 而想要实现室内无碰撞的自主飞行与目标检测还需要对微小型四旋翼顶层飞控系统进行设计, 以满足相关需求。本章节对微小型四旋翼在室内环境工作的两种飞行模式进行设计, 分别为室内自主巡航模式和目标检测跟踪模式。

1.4.1 室内自主巡航模式设计

目前常用的室内导航方法中总是强调足够精确的地图信息与位置信息, 然后通过 A-star^[18] 或 RRT*^[19] 等算法得到最优路径。但是这些方案都

式中: $e_{w \max}$ 和 τ_{\max} 是与饱和相关的参数, 由实际使用的平台决定。

同样的, 位置控制器在水平和垂直两个通道上都相应的添加饱和控制。

通过控制器模块得到四旋翼三轴期望力矩与期望升力后, 需要通过控制分配模块将其合理的分配给各动力单元。X 型布局的四旋翼无人机四组电机与桨叶产生的力与力矩的效率模型如下:

$$c_T = \frac{\rho D_p^4 C_T}{4\pi^2}, c_M = \frac{\rho D_p^5 C_M}{4\pi^2} \quad (5)$$

C_T 、 C_M 为无量纲的拉力系数和转矩系数。

则控制分配模型可以表示为

$$\begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} = C_4 \begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

需要强大的硬件支持以及消耗大量的能量, 对于微小型无人机来说显然不适用。因此, 在 BUG 算法^[20] 的启发下, 本文提出了一种仅用 3 个小型激光测距仪实现无人机室内无碰撞飞行的自主巡航方案。

考虑无人机图像传输模块的位置和室内环境结构特点, 选择的激光测距仪安装方式如图 3 所示, 图中 1 表示前向测距仪, 测得的数据为 l_1 , 2、3 表示侧向激光测距仪, 测得数据为 l_2 、 l_3 , 且有 $l_a = (l_2 + l_3)/2$ 。

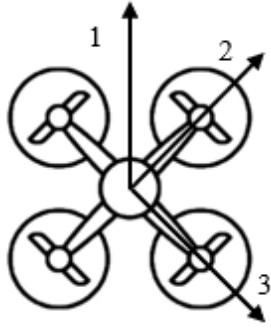


图3 激光测距仪配置方案图

Fig. 3 Configuration diagram of the laser rangefinder

在室内自主巡航模式下工作时,无人机处于定点模式。在该模式下,无人机的导航定位信息由下向光流传感器获取的期望水平速度信息与侧向激光测距传感器获取的期望偏航角信息组成,因此对这三个通道所控制的运动分别进行设计。

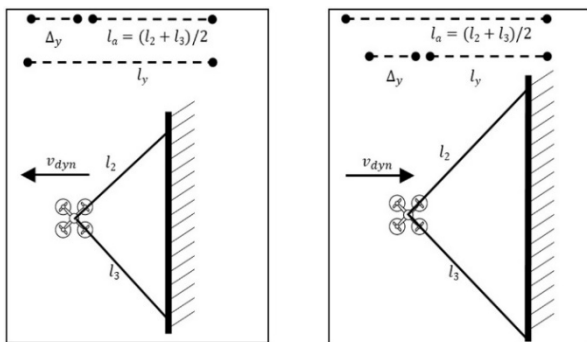
1) 横向控制通道

期望速度 v_{dya} 的控制器可以表示如下:

$$v_{dya} = \begin{cases} 0 & (|l_a - l_y| \leq \Delta_y) \\ sat_{gd}(k_{yap}(l_a - l_y), v_{y\max}) & (|l_a - l_y| > \Delta_y) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_{yap} 为比例控制系数; $v_{y\max}$ 为与饱和相关的系数; Δ_y 为横向运动的误差阈值; l_y 为横向运动的安全距离基准值。

该控制器的目的是使无人机始终与激光测距仪一侧的物体保持安全的距离。当侧向距离与安全阈值之差在误差允许范围内时不产生额外的横向运动,当超出误差允许范围时会根据误差产生一个不超过无人机执行能力的控制量。控制过程的示意图如图4所示。



(a) 左滚转

(b) 右滚转

图4 自主巡航模式横向运动示意图

Fig. 4 Diagram of lateral movement in autonomous cruise mode

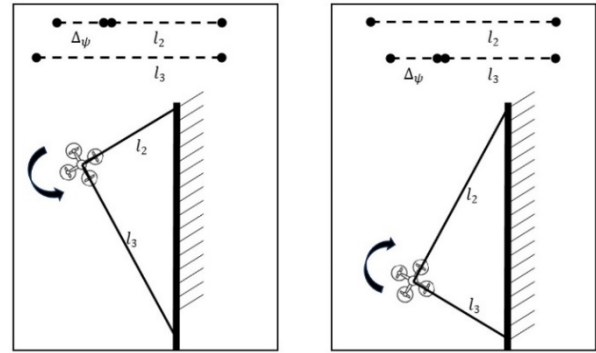
2) 偏航控制通道

同上,期望偏航角速度控制器表示如下:

$$r_{da} = \begin{cases} 0, & |l_3 - l_2| \leq \Delta_\varphi \\ sat_{gd}(k_{rap}(l_3 - l_2), r_{\max}), & |l_3 - l_2| > \Delta_\varphi \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_{rap} 为比例控制系数; r_{\max} 为与饱和相关的系数; Δ_φ 为偏航运动的误差阈值。

该控制器的目的是使无人机能沿着测距仪一侧物体的表面轮廓线运动,这也是BUG算法的基本思想,即围绕障碍物运动直至越过障碍物。简单概括即为当侧向两测距仪的数据之差大于误差阈值时,使无人机向测量数据大的一侧偏航。该方法可以帮助无人机较为平缓的渡过室内环境的转角处。控制过程的示意图如图5所示。



(a) 左偏航

(b) 右偏航

图5 自主巡航模式偏航运动示意图

Fig. 5 Diagram of yaw movement in autonomous cruise mode

3) 纵向控制通道

该控制器的目的是保证无人机与前向物体的安全距离,同时为其在转角处的运动提供更多的距离约束,可以表示为

$$v_{dxa} = \begin{cases} 0, & |l_1 - l_x| \leq \Delta_x \\ sat_{gd}(k_{rap}(l_1 - l_x), v_{x\max}), & |l_1 - l_x| > \Delta_x \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_{rap} 为比例控制系数; $v_{x\max}$ 为与饱和相关的系数; Δ_x 为纵向运动的误差阈值; l_x 为横向运动的安全距离基准值。

控制过程的示意图如图6所示。

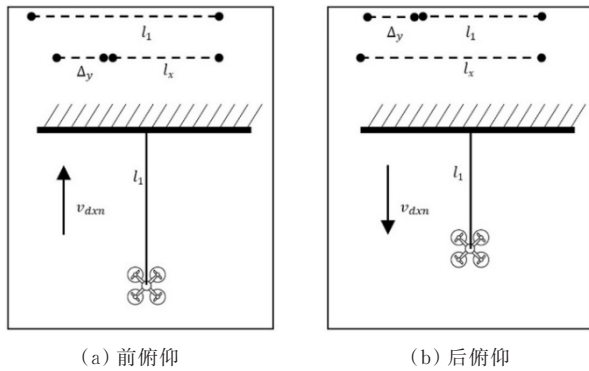


图6 自主巡航模式纵向运动示意图

Fig. 6 Diagram of longitudinal movement in autonomous cruise mode

在检测到目标进入下一个任务阶段前,微小型四旋翼平台将会一直以该模式工作直至电量耗尽。

1.4.2 目标检测跟踪模式设计

首先本文采用 SiPEED M1n 作为视觉信息的处理单元,以 OV7740 传感器作为图像获取单元,其相关参数如表 2 所示。

表2 目标检测硬件参数表

Table 2 Hardware parameters for target detection

硬件型号	质量/g	尺寸/mm	功耗/W
SiPEED M1n	3.6	25×22×2	1.5
OV7740	4	11×11×18	1

SiPEED M1n 可以很好的执行 YOLO-V2^[21] 算法对目标进行检测,虽然 V2 算法的识别精度与 V3-V8 版本的算法差距较大,但是轻量化的程序更加适合微小型平台,对于一般目标(比如人)的识别精度也能达到使用要求。如果对于人员之外的目标具有识别要求,可以在 ImageNet、PASCAL VOC、MS COCO 等目标检测数据集中选择对应的目标进行训练,如车辆、皮卡、猫等目标。而针对特殊环境中的特定目标,如坦克、装甲车等则需要自主制备训练数据集,通过网络训练得到对应目标的检测器部署在相关平台上。

将 OV7740 获取的分辨率为 320×240 的图片划分为 5×5 的网格,以中间网格为中心区域 M,其中像素点的横坐标范围为 64~96,纵坐标范围为 48~72。

目标检测与跟踪模式主要有两个阶段,第一阶段为在发现目标后,以图像中心点为基准得到

目标中心点的偏移量,通过不断修正该偏移量使目标位于图像中心区域,如图 7 所示。

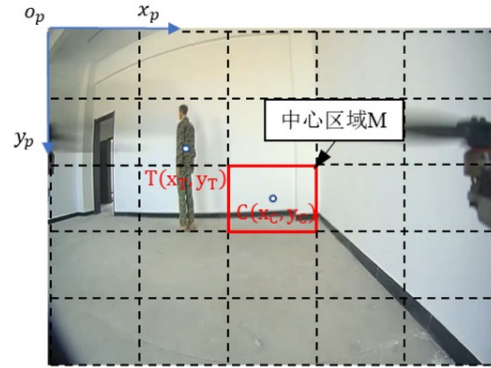


图7 检测图像上相关坐标系与特殊区域图

Fig. 7 Diagram of relevant coordinate systems and special areas on the detection image

若设图像中心点坐标为 (x_c, y_c) ,目标中心坐标为 (x_t, y_t) ,那么微小型四旋翼平台在横向和垂向上的偏移估计为

$$\begin{cases} f_y = \frac{\Delta x}{320} fov_x \\ f_z = \frac{\Delta y}{240} fov_y \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta x = x_c - x_t, \Delta y = y_c - y_t$$

式中: f_y, f_z 为微小型四旋翼平台横向和垂向上的相对偏移估计; fov_x, fov_y 为水平方向和垂直方向上的视场角。将这些偏移估计带入横向和垂向速度控制器即可使目标中心点逐渐移动至中心区域 M。

第二阶段为在实现目标中心移动后,控制前向距离,使无人机与目标之间的距离不大于期望距离 l_d 。与前一步类似,以前向距离之差 $f_x = l_1 - l_d$ 为控制输入量,通过带比例的饱和控制得到期望的纵向速度。

2 实验与结果

根据底层与顶层飞控的功能模块以及微小型四旋翼的刚体模型搭建仿真平台,对自主巡航以及目标跟踪模式分别进行仿真验证。

2.1 自主巡航模式验证

DARPA 在 FLA 计划中验证无人机室内自主功能时采用如图 8 所示的环境,可以看到在该环境中无明显杂物堆放,且墙壁转折处较少,房门处于

关闭状态。因此本文设计了类似的仿真环境, 进行密闭环境中的自主巡航试验。不考虑高度变化, 得到仿真轨迹如图 9 所示。



图 8 进行室内自主搜索的环境示意图

Fig. 8 The environment for indoor autonomous search

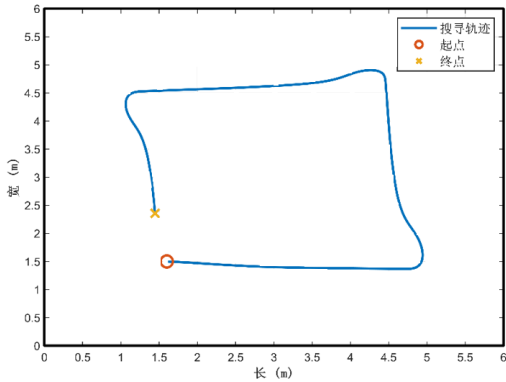


图 9 搜寻路线俯视图

Fig. 9 Top-Down view of the search route

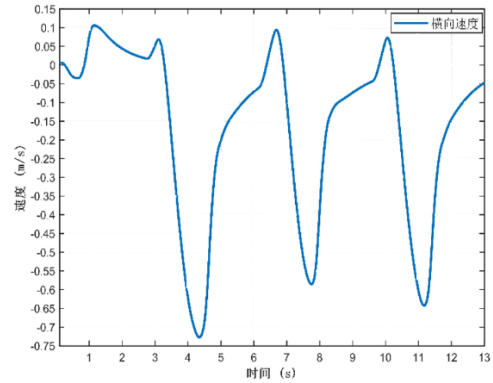
上述仿真过程假设微型四旋翼处于一个 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的矩形空间中, 采用定高模式飞行, 仿真参数如表 3 所示。

表 3 室内自主巡航仿真参数

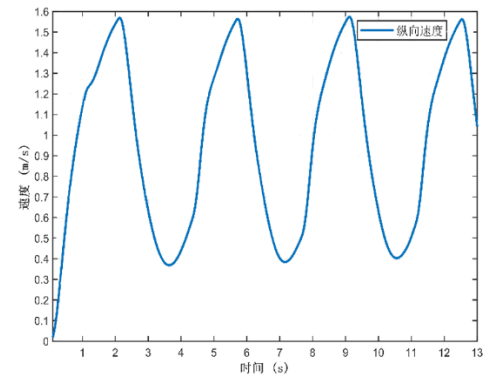
Table 3 Simulation parameters for indoor autonomous cruise

参数名称	具体数值
横向运动阈值	l_y 2.2 m
横向运动误差阈值	Δ_y 0.4 m
横向通道比例系数	k_{yap} 0.16
纵向运动阈值	l_x 1.95 m
纵向运动误差阈值	Δ_x 0.45 m
横向通道比例系数	k_{xap} 0.13
偏航运动误差阈值	Δ_φ 0.1 m
偏航通道比例系数	k_{rap} 0.24
室内环境大小	$6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$
微型四旋翼起始点坐标	(1.5 m, 1.5 m, 2 m)

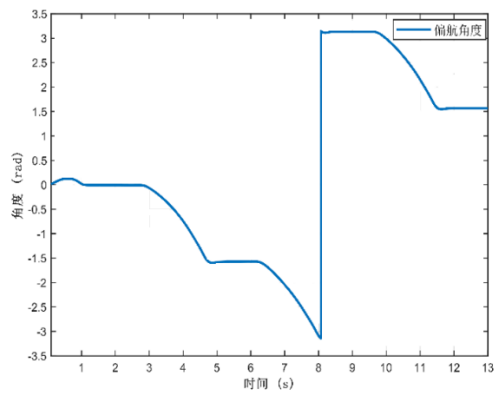
该过程中微型四旋翼的姿态角以及水平速度变化如图 10 所示。



(a) 横向速度变化



(b) 纵向速度变化



(c) 偏航角变化

图 10 姿态角与水平速度变化图

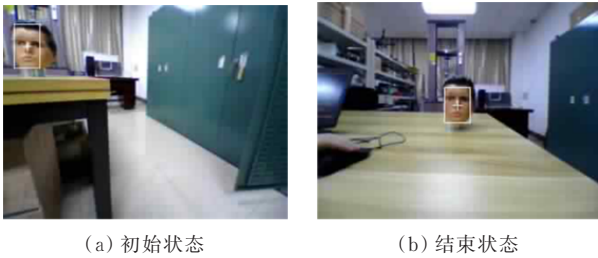
Fig. 10 Variation diagram of attitude angles and horizontal speed

从仿真结果来看, 微型四旋翼基本与边界保持平行, 间距维持在 1.5 m 左右, 在这种简单的室内场景中该方案是可以快速稳定的完成搜寻任务的。

本文所设计无人机在携带 100 g 载荷的情况下可以飞行 200~300 s,考虑从室外环境进入室内环境的过程,无人机在室内的工作时长大约为 100~150 s。整个仿真过程用时 13 s,不考虑发现目标以及进入目标跟踪打击阶段后的耗时,该型无人机可以连续在 4 个类似大小的房间中执行任务。能够完成对民用建筑中所有房间的搜索任务。

2.2 目标检测跟踪模式验证

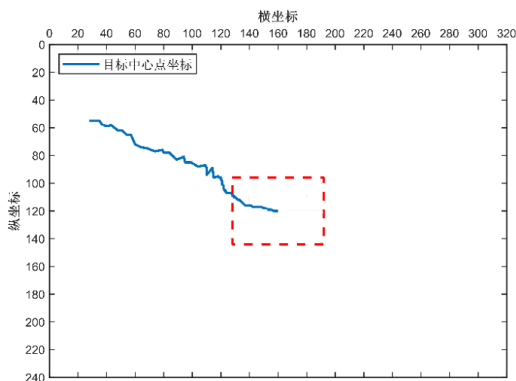
首先将待检测目标置于图像左上角,缓慢移动检测模块使目标逐渐移动至中心区域 M,如图 11 所示。



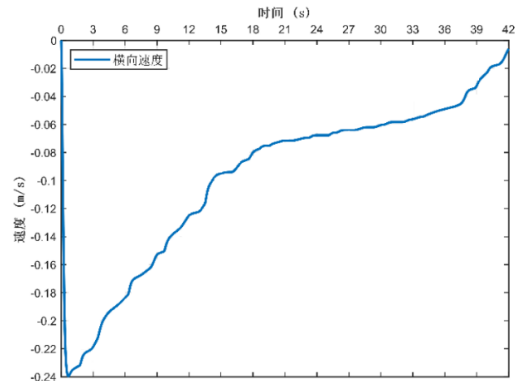
(a) 初始状态 (b) 结束状态

图 11 仿真起始与结束状态的输入图像
Fig. 11 Input images at the start and end states of the simulation

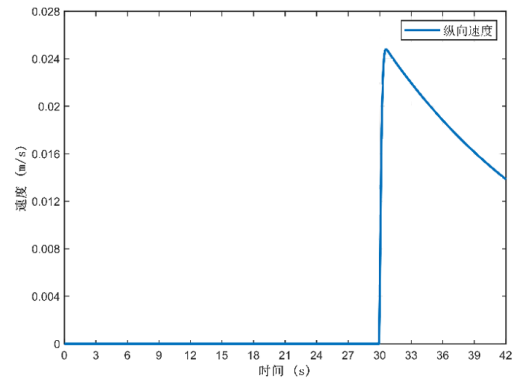
以该过程中获取的不同时刻目标中心点坐标为输入,得到对应的仿真输出如图 12 所示。



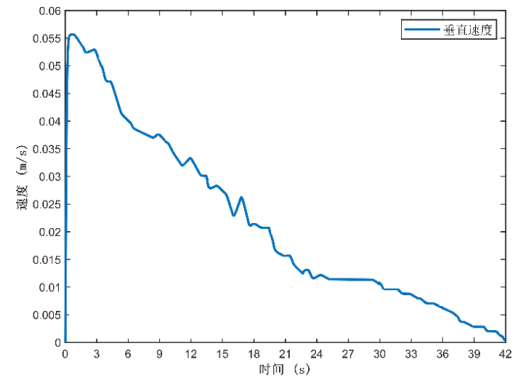
(a) 目标中心点坐标变化曲线



(b) 横向速度变化曲线



(c) 纵向速度变化曲线



(d) 垂直速度变化曲线

图 12 目标检测仿真过程相关数据图
Fig. 12 Diagram of relevant data from the target detection simulation process

从速度和位移趋势上来看,微小型四旋翼基于目标检测模块的室内目标检测与跟踪功能基本满足需求。

2.3 实物验证结果

将选用的飞控相关硬件连接,并选择合适的平台搭载该系统,如图 13~图 14 所示。

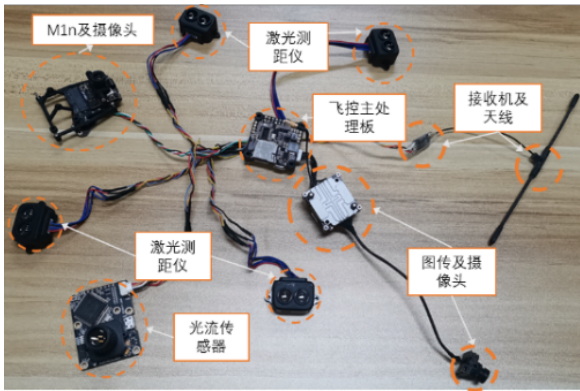


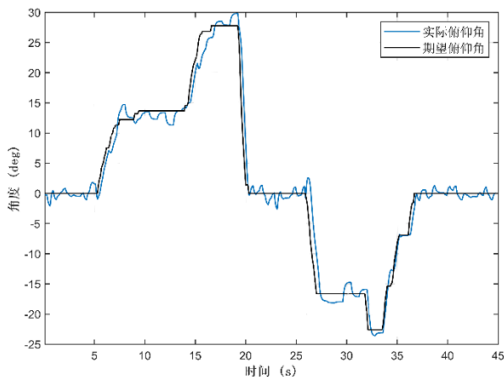
图 13 飞控系统硬件实物连接图
Fig. 13 Hardware connection diagram of the flight control system



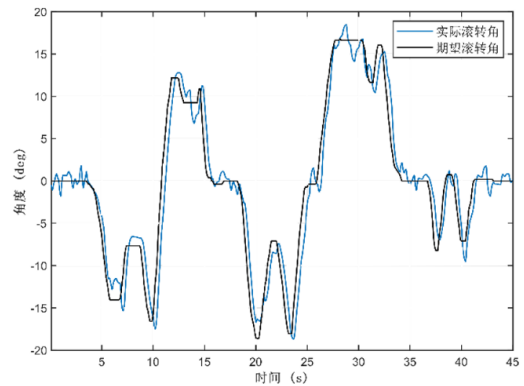
图 14 飞行试验平台实物图
Fig. 14 Physical image of the flight platform

1) 实物姿态稳定性试验

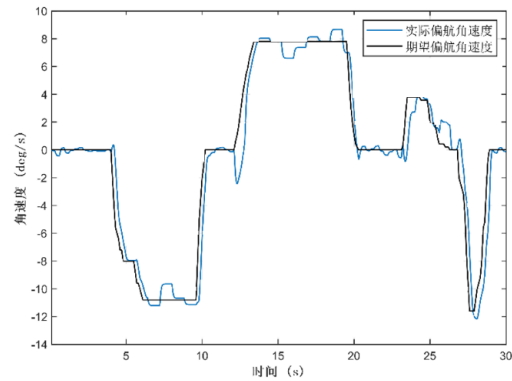
由实验人员操控微小型四旋翼在增稳模式下对其姿态稳定性进行验证, 结果如图 15 所示。



(a) 俯仰角变化跟随曲线



(b) 滚转角变化跟随曲线



(c) 偏航角速度变化跟随曲线

图 15 姿态验证各通道输入输出对比图
Fig. 15 Comparison diagram of input and output for each channel in attitude validation

从图 15 可以看出: 当期望输入为 0 时, 实际输出能较好的保持当前姿态。当期望值变化时, 平台能够较快做出反应, 虽然存在一定的控制超调以及噪声现象, 但是整体上能满足稳定性要求。

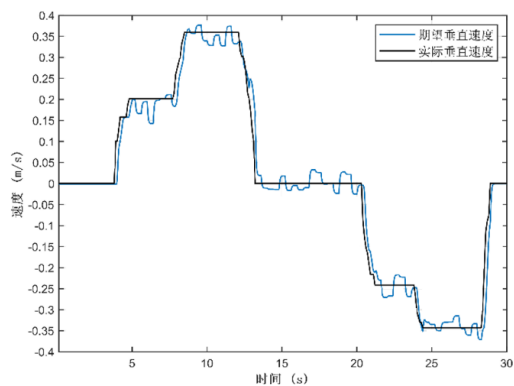
2) 实物位置稳定性试验

类似的, 在定高和定点模式下对位置稳定性进行验证, 结果如图 16~图 17 所示。

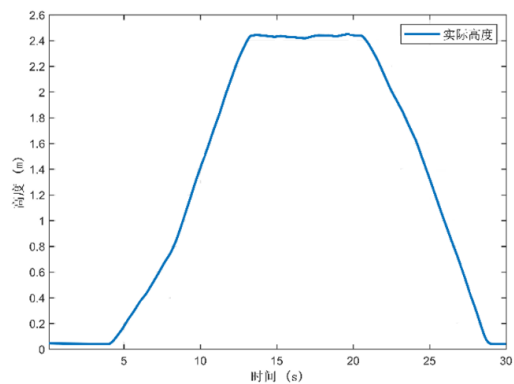
从图 16 可以看出: 定高模式下, 微小型四旋翼平台的起降、悬停都比较稳定, 对遥控指令的响应较快, 基本满足垂直位置稳定要求。

从图 17 可以看出: 微小型四旋翼平台能较好的追踪期望输入, 且控制过程平稳, 在没有指令输入的情况下能较好的维持当前位置。响应存在一定延迟是由于使用光流传感器进行水平速度估计

导致的,可以认为该平台基本满足水平位置稳定要求。

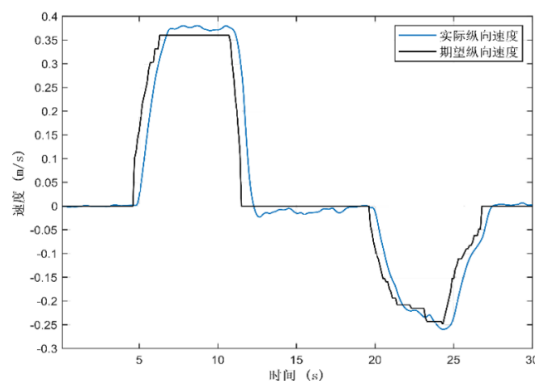


(a) 垂直速度变化跟随曲线

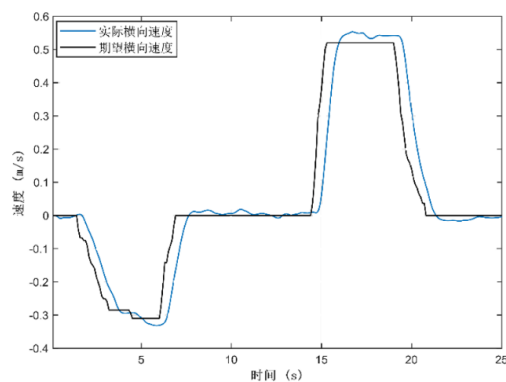


(b) 高度变化曲线

图 16 定高模式下垂向稳定性验证结果图
Fig. 16 Results of vertical stability validation in altitude hold mode



(a) 纵向速度变化跟随曲线

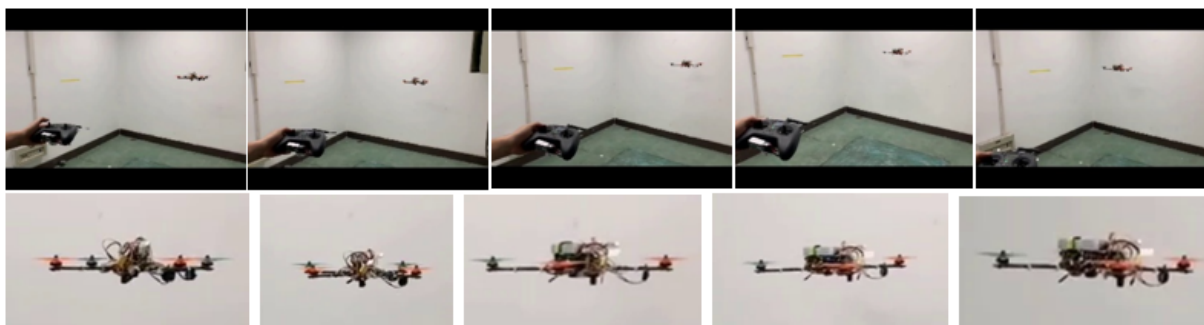


(b) 横向速度变化跟随曲线

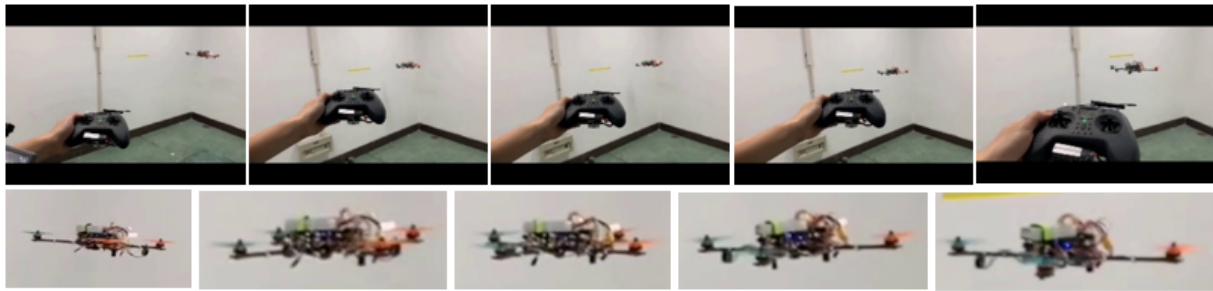
图 17 定点模式下水平稳定性验证结果图
Fig. 17 Results of horizontal stability validation in hover mode

3) 实物室内任务综合试验

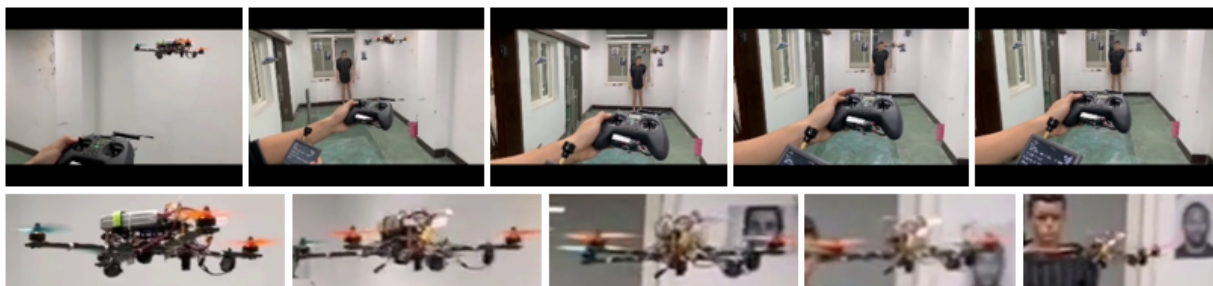
在 $6\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内放置一人偶模型,控制微小四旋翼在远离目标的位置起飞后切换为任务模式,结果如图 18 所示。



(a) 室内自主巡航阶段一



(b) 室内自主巡航阶段二



(c) 目标检测与跟踪阶段

图 18 实际场景中任务执行过程图

Fig. 18 Task execution process in actual scenarios

图 18 展示了室内任务的基本过程,其中每个阶段第一行五张图片是飞行过程截图,第二行为对应截图中微小型四旋翼的局部放大图。微小型无人机在该场景中的最大飞行速度为 0.5 m/s ,目标检测模块的探测范围为前向 4 m 的扇形区域。在自主巡航阶段一与阶段二中微小型无人机先后转过两个墙角,以 0.5 m/s 的速度贴墙飞行,人偶目标大约在 $1\sim 2 \text{ s}$ 后进入无人机探测范围,无人机切换任务模式为目标检测与跟踪模式。在目标检测与跟踪阶段,无人机先使目标逐渐处于图像中心区域,然后逐步靠近目标。该场景中人偶目标处于静止状态,无人机在 3 s 内完成对中与接近目标的操作。

3 结 论

本文在功耗、质量受限的情况下提出了一种基于激光测距仪的微小型四旋翼在简单室内环境自主搜寻目标的方案,在实际场景中验证该方案是可行的。虽然验证所用场景结构简单,但是验证了该方法体系的可行性,对比目前常用的 SLAM 体系具有更低的功耗、更小的尺寸、更低的成本和较高的发展空间。如果能够优化传感器组

合及其布置方式,进一步细化探索空间的信息,提高该方法体系的自主性,可以应用于更加复杂的环境,在工程实用性上具有探索意义。

参 考 文 献

- [1] SHEN Shaojie, MICHAEL N, KUMAR V. Autonomous multi-floor indoor navigation with a computationally constrained MAV[C]// International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 20-25.
- [2] GRZONKA S, GRISETTI G, Burgard W. A fully autonomous indoor quadrotor[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 28(1): 90-100.
- [3] SUN Jiabi, SONG Jin, CHEN Haoyao. Autonomous state estimation and mapping in unknown environments with on-board stereo camera for micro aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(9): 5746-5756.
- [4] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE transactions on robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [5] 张博翰, 蔡志浩, 王英勋. 电动 VTOL 飞行器双目立体视觉导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(7): 882-887.
ZHANG Bohan, CAI Zhihao, WWANG Yingxun. Stereo vision navigation method for electric VTOL aircraft [J].

- Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(7): 882-887. (in Chinese)
- [6] 刘庆健, 疏利生, 刘刚, 等. 低空无人机路径规划算法综述[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 24-34.
LIU Qingjian, SHU Lisheng, LIU Gang. Overview of low-altitude UAV path planning algorithms [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 24-34. (in Chinese)
- [7] 肖衢, 张汇, 周文, 等. 基于改进虚拟弹簧模型的无人机路径规划算法研究[J/OL]. 航空工程进展, 1-8 [2024-03-13].
XIAO Heng, ZHANG Hui, ZHOU Wen. Research on UAV path planning algorithm based on improved virtual spring model[J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 1-8 [2024-03-13]. (in Chinese)
- [8] 辛建霖, 左家亮, 岳龙飞, 等. 基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 60-67.
XIN Jianlin, ZUO Jialiang, YUE Longfei. Autonomous flight path planning of UAV based on improved heuristic ant colony algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 60-67. (in Chinese)
- [9] CHAMBERS A, SCHERER S, YODER L. Robust multi-sensor fusion for micro aerial vehicle navigation in GPS-degraded/denied environments[C]// American Control Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 1892-1899.
- [10] 石鹏. 双盲环境下基于激光雷达/惯性融合的无人机自主导航技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
SHI Peng. Autonomous navigation technology for unmanned aerial vehicles based on laser radar/inertial fusion in dual-blind environments[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [11] VALAVANIS K, VACHTSEVANOS G. Handbook of unmanned aerial vehicles[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015: 83-91.
- [12] AUSTIN R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment[M]. Wiltshire: John Wiley & Sons, 2011: 45-74.
- [13] RAMESH P S, JEYAN M L. Mini unmanned aerial systems (UAV)-a review of the parameters for classification of a mini UAV[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2020, 7(3): 5.
- [14] CAI Guowei, DIAS J, SENEVIRATNE L. A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: recent advances and future development trends[J]. Unmanned Systems, 2014, 2(2): 175-199.
- [15] DILLARD R A. Detectability of spread-spectrum signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979(4): 526-537.
- [16] 龚瑞. 微型四旋翼飞行器飞行控制系统设计与验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
GONG Rui. Design and verification of flight control system for miniature quadrotor aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [17] 吴宏鑫, 沈少萍. PID控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003(1): 37-42.
WU Hongxin, SHEN Shaoping. Application and theoretical basis of PID control[J]. Control Engineering, 2003(1): 37-42. (in Chinese)
- [18] 林娜, 李天啸. 基于双向A×算法的城市无人机航路规划[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016(4): 55-60.
LIN Na, LI Tianxiao. City UAV route planning based on bi-directional A× algorithm [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016(4): 55-60. (in Chinese)
- [19] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.
- [20] LUMELSKY V J, STEPANOV A A. Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape [J]. Algorithmica, 1987(2): 403-430.
- [21] LIU Wei, ANGUELOV D, ERHAN D. SSD: single shot multi-box Detector[C]// European conference on computer vision. New York, USA: Springer, Cham, 2016: 21-37.

(编辑:马文静)