

基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法

沈 跃 张 念 孙志伟 沈亚运 刘 慧
(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对四旋翼植保无人机坡地适应性差、作业时定高精度低的问题,提出了一种融合立体视觉、气压计及惯性测量单元(IMU)的多速率卡尔曼滤波估计无人机高度的仿地飞行方法。首先基于无人机实时高度、姿态与最佳视觉检测区域之间的关系,提出了视觉检测区域自适应算法;然后融合多传感器信息建立多速率卡尔曼滤波模型用以估计无人机对地高度;最后通过自主飞行实验对无人机高度估计算法与仿地飞行方法进行验证。实验结果表明,当飞行高度为2 m,飞行速度为1、2、3 m/s时,植保无人机在平坦地面与15°缓坡区域均可实现高度估计平均绝对误差小于20 mm,高度估计标准差小于30 mm;高度控制平均绝对误差小于30 mm,高度控制标准差小于30 mm;本文验证了植保无人机在地形变化场景下仿地飞行的有效性,为植保无人机在复杂地形自动化作业奠定了基础。

关键词: 植保无人机; 立体视觉; 多速率卡尔曼滤波; 信息融合; 仿地飞行

中图分类号: S251; S494 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0190-08 OSID: 

Terrain Following Flight for Plant Protection UAV Based on Multi-rate Kalman Filter

SHEN Yue ZHANG Nian SUN Zhiwei SHEN Yayun LIU Hui
(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problems that the quadrotor plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) has poor adaptability in sloping land and imprecise height measurement accuracy during operation, a terrain following flight method based on multi-rate Kalman filtering fusion of stereo vision, barometer and inertial measurement unit (IMU) information was proposed to estimate the height of UAV. Firstly, the ZED2 camera was used to obtain the binocular image of the ground below the UAV, and the point cloud information corresponding to the binocular image was calculated through the parallax principle. After analyzing the relationship between the height of the point cloud, the attitude of the UAV and the best visual detection area, an adaptive algorithm for the visual detection area was proposed to select the ground detection area. The accurate visual ground height was obtained by analyzing the point cloud data of the detection area. Secondly, a multi-rate Kalman filter model was established which fused the visual height, barometer and IMU information to estimate the height above the ground of the UAV. Finally, a two-level control system was composed of an NVIDIA microcomputer and a flight controller. The UAV's height estimation and terrain following flight performance were verified by flight experiments. The height estimation results of remote-control flight showed that the method proposed can achieve height estimation with an absolute average error of 46.8 mm and a standard deviation of 38.2 mm under large height changes. The autonomous terrain following flight experiment showed that when the flight height was set to be 2 m and the speed was 1 m/s, 2 m/s and 3 m/s, respectively, no matter on the flat ground or the gentle slope of 15°, the absolute average error of height estimation was less than 20 mm, and the standard deviation of height estimation was less than 30 mm; the absolute average error of height control was less than 30 mm, and the standard deviation of height control was less than 30 mm. The research result verified the effectiveness of the plant protection UAV in the terrain changing scene, and laid a foundation for the automatic operation of the plant protection UAV in complex terrain.

Key words: plant protection UAV; stereo vision; multi-rate Kalman filter; information fusion; terrain following flight

0 引言

植保无人机在农业领域的应用日益普遍。与传统人工或地面植保机械^[1]作业相比,植保无人机^[2-3]具有成本低、效率高、可适应不同农作物品种及对作物破坏小等优点^[4]。因此,植保无人机在作物播种、长势监测^[5]及农药喷洒^[6]等环节发挥着越来越重要的作用。

植保无人机作业时需要与农作物保持适当高度^[7-8]。当前植保无人机的作业方式主要由专业人员遥控作业,由于操作人员水平差异大、农作物高度不一致以及地形复杂等因素,植保无人机作业时存在定高精度差^[9]、药液浪费^[10]等问题。因此,实时精确计算植保无人机对地高度,并依此实现稳定可靠的自主仿地飞行^[11-13]意义重大。

近年来,国内外学者针对四旋翼无人机高度估计进行了广泛研究。气压计以其成本低、体积小、可靠性高等特点,在无人机高度测量领域广泛应用。如文献[14]设计了以无线电高度确定基准高度、用气压计确定相对高度,并用起飞点实测温度进行补偿的方法来确定无人机高度。文献[15-16]利用气压计设计了较高精度、低成本的高度测量方案。因气压计测高精度低,易受温度、气流变化等因素影响,超声波传感器、毫米波雷达、激光雷达等高度测量传感器逐渐得到了应用^[17-19]。然而,采用单一传感器测量无人机飞行高度不够精确且易受干扰,如超声波易穿透叶面导致测距不准;单点激光雷达可靠性差,而多线激光雷达和固态激光雷达重量大^[20],不适合应用于无人机测高;毫米波雷达精度较差且返回信息量少等。越来越多的研究者通过融合多传感器信息来提高无人机测高精度。如文献[21]通过融合单目视觉及 IMU 信息进行高度估计;文献[22]提出一种融合多传感器的高度无缝融合导航方法,并实现误差为 47.07 cm 的定高飞行;文献[23]针对山地果园的航空植保作业,设计了基于 GNSS 与视觉导航融合的航迹控制系统,航迹误差为 -47~42 cm,平均误差为 -9 cm。

卡尔曼滤波^[24]因其精度高、速度快等特点,在多传感器信息融合领域得到广泛应用。文献[25]利用卡尔曼滤波对视觉、惯性测量系统及超声波测距仪等传感器信息进行融合,实现对无人机的相对高度估计;文献[26]提出一种基于多传感器数据融合和容错卡尔曼滤波的组合导航方案;文献[27]通过将差分 GPS 高度与对地毫米波雷达高度进行卡尔曼滤波融合,植保无人机仿地飞行高度误差小于 40 cm;文献[28]融合 RTK-GPS、激光雷达及其它

传感器信息,实现垂直方向平均定位误差为 5.3 cm 的自主定高飞行。

针对上述方法对地高度测量误差较大、易受 GPS 信号影响等问题,本文提出以多速率卡尔曼滤波融合立体视觉、气压计和惯性测量单元(IMU)信息估计植保无人机高度的仿地飞行方法以实现植保无人机的仿地飞行控制。阐述高度估计算法与仿地飞行方法的实现过程,并通过遥控飞行、自主仿地飞行实验对本文方法进行验证。

1 控制系统设计

1.1 实验平台

使用四旋翼无人机为载体搭建飞行实验平台。四旋翼无人机主要组成部分包括:H 型碳纤维机架、好盈 X6 电机、2388 碳纤维桨叶、雷迅 V5+ 开源飞行控制器、云卓 T12 遥控器及接收机、NEO V2 GNSS 定位模块、48 V、13 000 mA·h 锂电池。图 1 为四旋翼无人机实验平台。



图 1 四旋翼无人机实验平台

Fig. 1 Quadrotor experimental platform

在四旋翼无人机平台上搭载视觉传感器、机载计算机及无线数传模块等部件,组成完整的无人机飞行平台。主要部件包括:ZED2 型双目相机(ZED 二代,Stereolabs,美国)、NVIDIA AGX Xavier 机载计算机(NVIDIA,美国)和 Homer 无线数传(成都阿木实验室)。

1.2 仿地飞行控制系统

本系统以四旋翼无人机为平台,由飞行控制器和机载计算机组成两级控制器,采用 ZED2 型双目相机作为无人机对地高度测量传感器,基于 MAVLink 通信协议实现了如图 2 所示的植保无人机仿地飞行控制系统。

飞行控制系统由 3 部分组成:地面控制站、遥控端及无人机系统。其中,地面控制站包括便携式计算机与无线数传地面端;遥控端由飞行员及云卓 T12 遥控器组成,便于在实验过程中对无人机飞行模式进行切换,保证飞行安全。系统通过无线数传模块构成局域网,飞行员可在地面计算机远程操作

机载计算机终端,同时可在 QGC 上位机查看无人机飞行状态。

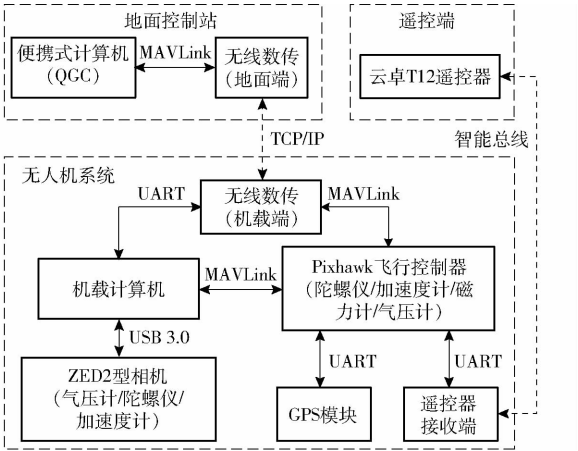


图 2 仿地飞行控制系统组成框图
Fig. 2 Block diagram of control system

2 无人机飞行高度估计与控制算法

2.1 视觉检测区域自适应算法

本文使用 NVIDIA AGX Xavier 微型计算机由双目图像计算相机视场内像素点对应的点云信息。为准确检测无人机高度,利用视觉检测区域自适应算法在相机视场对应点云图内选择机身下方检测区域和飞行方向的前方检测区域,并将两个区域对应的点云块进行处理以计算无人机高度。四旋翼无人机飞行时下方检测区域及前方检测区域如图 3 所示。

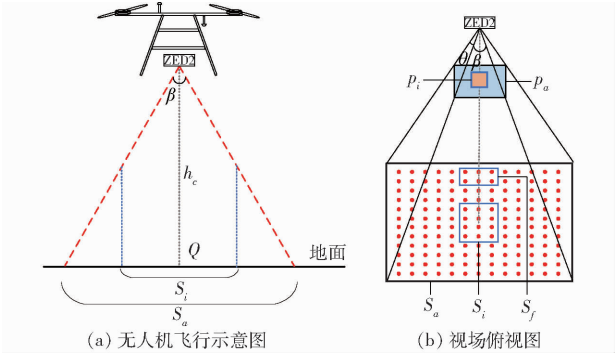


图 3 无人机飞行时相机视场示意图
Fig. 3 Field of view of UAV camera in flight

图 3a 为植保无人机飞行示意图,其中 h_c 为相机图像中心测量的无人机对地高度; β 为相机在垂直于飞行方向的视场角; Q 为相机视场中心点; S_a 为相机视场在高度为 h_c 时在地面上的投影面积; S_i 为下方检测区域。综合考虑植保无人机自身尺寸及作业高度,确定下方检测区域尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,前方检测区域尺寸为 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。

前方检测区域的处理方法与下方检测区域一致,因此本文仅对下方检测区域的计算进行阐述。

图 3b 为视场俯视图,其中 S_f 为前方检测区域, θ 为相机视场在飞行方向上的视场角,点云对应的像素平面为 p_a ,下方检测区域对应的点云像素区域为 p_i 。相机像素平面与地面投影的关系为

$$p_i = x_{p_i} y_{p_i}$$
 (1)

$$S_a = 4h_c^2 \tan \frac{\theta}{2} \tan \frac{\beta}{2}$$
 (2)

$$\frac{S_i}{S_a} = \frac{p_i}{p_a} = \frac{x_{p_i} y_{p_i}}{p_a} = \frac{1}{4h_c^2 \tan \frac{\theta}{2} \tan \frac{\beta}{2}}$$
 (3)

式中 x_{p_i} ——下方检测区域点云像素块长
 y_{p_i} ——下方检测区域点云像素块宽

从式(1)~(3)易知,当四旋翼无人机的高度 h_c 发生变化时,下方检测区域对应的点云像素区域 p_i 也会发生变化,使得地面的检测区域 S_i 始终保持在合理范围。

当无人机定高飞行过程中同时有高度和姿态变化时,考虑地形变化,此时需要修正检测区域。图 4 为无人机姿态改变时相机视场与检测区域示意图,此时首先由式(1)~(3)计算出理想状态下下方检测区域对应的点云像素区域 p_i ;其次根据无人机横滚角 γ 、俯仰角 λ 及公式

$$\Delta x_i = h_c \sin \gamma$$
 (4)

$$\Delta y_i = h_c \sin \lambda$$
 (5)

计算出实际检测区域偏移量 Δx_i 、 Δy_i 。

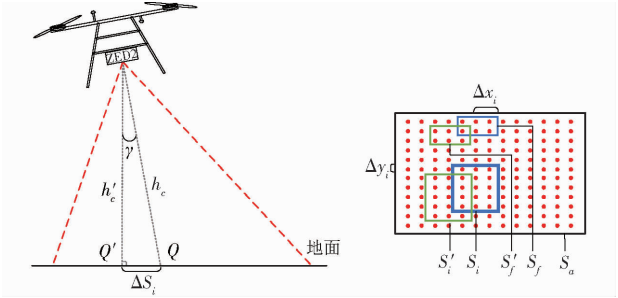


图 4 无人机姿态变化时相机视场示意图
Fig. 4 Field of view of camera when UAV attitude changed

修正后下方检测区域面积为

$$S'_i = (x_i + \Delta x_i)(y_i + \Delta y_i)$$
 (6)

式中 S'_i ——修正后下方检测区域面积
 x_i ——下方检测区域长
 y_i ——下方检测区域宽

利用公式

$$\frac{x_i + \Delta x_i}{2h'_c \tan \frac{\beta}{2}} = \frac{x_{p_i}}{R_o}$$
 (7)

$$\frac{y_i + \Delta y_i}{2h'_c \tan \frac{\theta}{2}} = \frac{y_{p_i}}{C_o}$$
 (8)

式中 h'_c ——无人机与地面高度

R_o ——图像横向分辨率

C_o ——图像纵向分辨率

确定下方检测区域及其对应的点云块,最后对点云块进行处理,计算无人机对地高度。

2.2 基于多速率卡尔曼滤波的高度估计

本文利用多速率卡尔曼滤波融合视觉测量高度、IMU 和气压计传感器信息,有效降低了仅由视差原理计算相对高度产生的较大误差,使无人机的对地高度估计更加精准。

传感器测量值包含噪声。假设已知无人机飞行高度 h 、速度 v 以及加速度 a ,对各传感器测量值进行补偿,建立视觉测量高度 h_r 、气压计差分速度 v_b 和垂向加速度 a_z 的量测方程为

$$h_r = h + \varepsilon_1 \quad (9)$$

$$v_b = (h_{b,k} - h_{b,k-1})\tau = v + \varepsilon_2 \quad (10)$$

$$a_z = a + \varepsilon_3 \quad (11)$$

式中 h_b ——气压计测量值 k ——采样时刻

τ ——气压与海拔转换系数

ε_1 ——双目测距噪声

ε_2 ——气压计测量噪声

ε_3 ——加速度计测量噪声

据此,建立无人机高度估计运动学模型为

$$h_k = h_{k-1} + v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (12)$$

式中 h_k —— k 时刻估计高度

Δt —— k 与 $k-1$ 时刻的时间差

选取状态向量 $\mathbf{X} = [h \ v \ a]^T$,由此得到高度估计系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} h \\ v \\ a \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & v\Delta t & 0.5a\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ v \\ a \end{bmatrix}_{k-1} + w_{k-1} \quad (13)$$

式中 w_{k-1} ——系统噪声

由上述对双目测距、气压计差分速度以及加速度的测量分析,建立系统测量方程为

$$\begin{bmatrix} h_r \\ v_b \\ a_z \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ v \\ a \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}_k \quad (14)$$

各传感器采样频率不一致,双目相机、气压计、IMU 采样频率分别为 50、25、100 Hz。多速率卡尔曼滤波融合不同速率的传感器信息以更好利用不同传感器的信息。

参考文献[29-30]的方法,建立多传感器的数学模型为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{y}_i(k) = \boldsymbol{\eta}_i(k)\mathbf{H}_i\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_i(k) \quad (16)$$

式中 $\mathbf{x}(k)$ —— k 时刻的状态向量

$\mathbf{A}$ ——系统矩阵

$\mathbf{B}$ ——系统噪声驱动矩阵

$\mathbf{w}(k)$ ——输入噪声矩阵

$\mathbf{y}_i(k)$ ——传感器 i 的测量值

$\mathbf{H}_i$ ——测量矩阵

$\mathbf{v}_i(k)$ ——传感器 i 的测量噪声矩阵

$\boldsymbol{\eta}_i(k)$ ——具有伯努利分布的随机序列

式(15)中,状态向量的初始值 $\mathbf{x}(0)$ 为随机变量,它的均值和误差协方差分别为 $\mathbf{x}_0, \mathbf{p}_0$,假设 $\mathbf{x}(0)$ 、 $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}_i(k)$ 相互独立。变量 $\boldsymbol{\eta}_i(k)$ 取值为 0 或 1。

图 5 为不同速率传感器采样示意图。

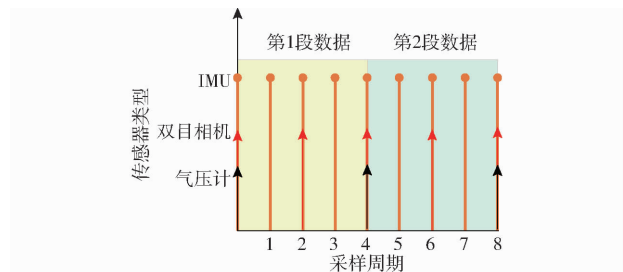


图 5 多速率多传感器采样示意图

Fig. 5 Multi-rate multi-sensor sampling schematic

在考虑采样频率较低的传感器时,式(16)中传感器 i 的观测值仅在 k 为 $0, M, 2M, \dots$ 时可用, M 为低速传感器与高速传感器之间的采样时间倍数。为了表示采样率较低传感器 i 的模型,将状态空间模型扩展到以 k 为单位的 M 增量的步骤为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+2) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k+1) = \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k+1)) = \\ &= \mathbf{A}^2\mathbf{x}(k) + [\mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{w}(k+1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

参照式(17)有

$$\mathbf{x}(k+M) = \mathbf{A}^M\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_M\mathbf{w}_M(k) \quad (18)$$

其中

$$\mathbf{w}_M(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{w}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{w}(k+M-1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{B}_M = [\mathbf{A}^{M-1}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^{M-2}\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{B}] \quad (20)$$

式中 $\mathbf{w}_M(k)$ ——输入噪声 $\mathbf{B}_M$ ——参数矩阵

由于过程噪声为零均值高斯序列,输入噪声矩阵的协方差可以看作

$$\mathbf{E}\{\mathbf{w}_M(k)\mathbf{w}_M^T(m)\} = \mathbf{Q}_M(k)\delta(k-m) \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{Q}_M(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}(k+1) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Q}(k+M) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中 $\mathbf{Q}_M(k)$ ——对角矩阵

$\delta(k-m)$ ——克罗内克函数

m —— M 增量采样时刻

由于 $v(k)$ 和 $w(k)$ 不相关,故 $v(k)$ 和 $w_M(k)$ 也不相关。

与传统卡尔曼滤波类似,多速率卡尔曼滤波分为两个步骤:

预测环节

$$\hat{x}(k+M/k) = A^M \hat{x}(k/k)$$
$$P(k+M/k) = A^M P(k/k) A^{M^T} + B_M Q_M(k) B_M^T$$

更新环节

$$K(k+M) =$$
$$P(k+M/k) H_i^T (H_i P(k+M/k) H_i^T + R_i(k))^{-1}$$
$$P(k+M/k+M) = (I - K(k+M) H_i) P(k+M/k)$$
$$\hat{x}(k+M/k+M) = (I - K(k+M) H_i) A^M \hat{x}(k/k) +$$
$$K(k+M) y_i(k)$$

式中 I ——单位矩阵 P ——估计协方差
 $R_i(k)$ ——测量噪声协方差

图 6 为无人机对地高度估计流程图。首先由双目相机获取图像,并由视差原理计算出对应的点云信息;然后根据高度、姿态信息选择检测区域对应的点云块,并对点云块进行坏点剔除、计算点云块对应的高度;最后对双目测量高度及气压计、IMU 信息进行融合,得到精准的植保无人机对地高度。

2.3 飞行高度控制器设计

本文设计了基于机载计算机和飞行控制器的两级控制器。飞行控制器主要保证无人机的实时姿态

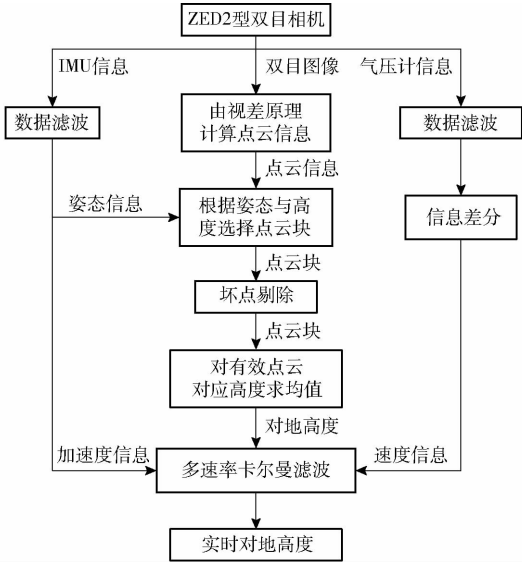


图 6 无人机对地高度估计算法流程图
Fig. 6 Flowchart of height estimation algorithm

控制和位置控制,机载计算机发送速度控制指令给飞行控制器实现仿地飞行。

图 7 为串级 PID 控制框图。控制逻辑在飞行控制器内实现,保证位姿控制的稳定性与实时性。角速度 PID 控制器与角度 P 控制器共同实现了四旋翼无人机的姿态控制;速度 PID 控制器则保证了四旋翼无人机在空间三轴上的精准运动;位置控制器实现了初步的无人机位置控制。

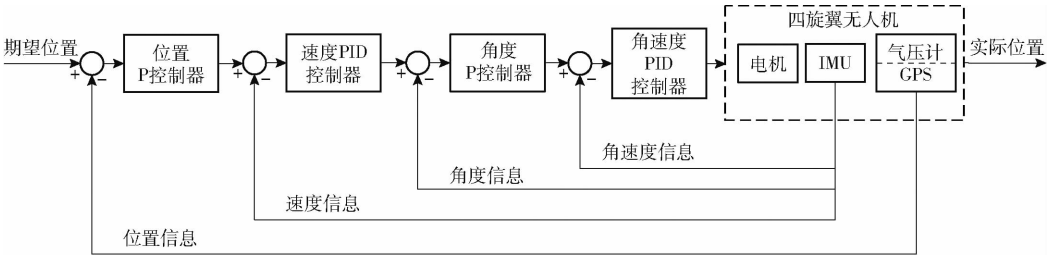


图 7 串级 PID 控制框图
Fig. 7 Cascade PID control block diagram

图 8 为两级控制器示意图。机载计算机负责传感器信息融合和高度控制,经多速率卡尔曼滤波估计出精准的无人机对地高度和无人机前方高度后,经由前馈比例控制器向飞行控制器发送速度控制指令;飞行控制器主要实现实时的无人机位姿控制,并实时接收机载计算机和遥控器的指令。

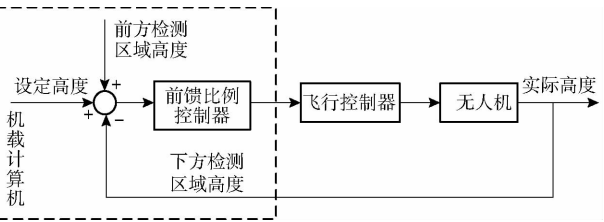


图 8 两级控制器示意图
Fig. 8 Schematic of two level controller

图 9 为仿地飞行控制系统的完整工作流程。

3 实验

3.1 视觉检测区域自适应算法验证

应用视觉检测区域自适应算法可快速获取检测区域点云信息。图 10 为无人机实际飞行实验中采集的图像和点云信息,其中图 10a 为 ZED2 左侧相机捕获的图像,图 10b 为处理后的有效检测区域点云,点云坐标系以相机坐标为原点。

图 11 为下方检测区域点云高度分布图。此时,数据点与相机的距离在 1 850 ~ 2 200 mm 范围内,其中 83% 分布在 1 950 ~ 2 100 mm。相对于单点激光和毫米波雷达,由视觉点云的统计信息可以获取更丰富、稳定的无人机对地高度信息。

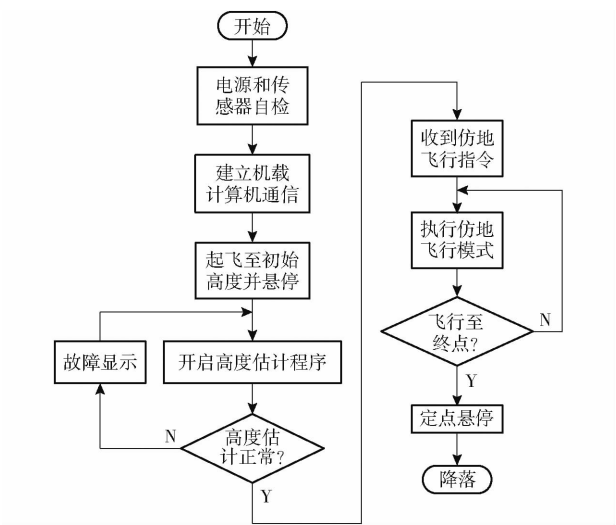


图 9 系统工作流程图
Fig. 9 System work flowchart

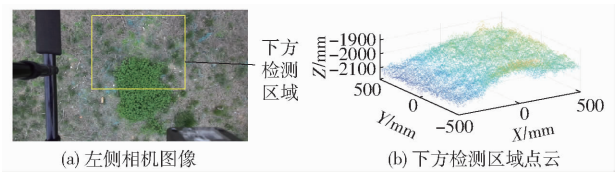


图 10 下方检测区域及其点云图
Fig. 10 Detection area and point cloud image

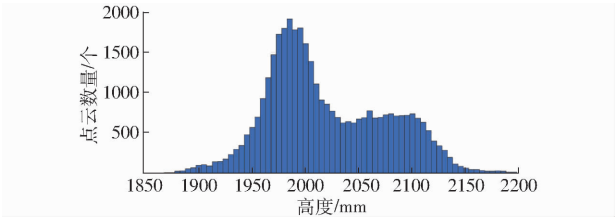


图 11 下方检测区域高度分布图
Fig. 11 Height distribution diagram of detection area

表 1 为点云信息的统计分析,其中均值与众数、中位数的差值分别为 35.1、15.1 mm,误差较小。本文采用均值作为视觉测距值参与融合,前方检测区域点云处理流程与此一致。

表 1 下方检测区域高度统计分析结果
Tab.1 Height statistical analysis results of detection area

参数	数值
点云数量/个	36 865
均值/mm	2 019. 1
最小值/mm	1 855
最大值/mm	2 198
中位数/mm	2 004
众数/mm	1 984
众数数量/个	404
标准差/mm	55. 7

3.2 遥控飞行高度估计实验

为对本文高度估计算法进行验证,在遥控飞行模式下,将本文方法估计无人机高度与欧雷激光雷

达测量高度进行对比。欧雷激光雷达(LR-1BS2型,探测角度270°)测距精准(统计误差小于2 cm),适合作为高度测量参考对象。

图 12 为激光雷达测量的参考高度、视差原理测量高度以及本文方法融合高度曲线。由各曲线对比可知,在无人机飞行高度显著变化时利用视差原理测量高度始终与激光雷达测量高度存在较大差值,本文方法融合高度则更加接近激光测量值。

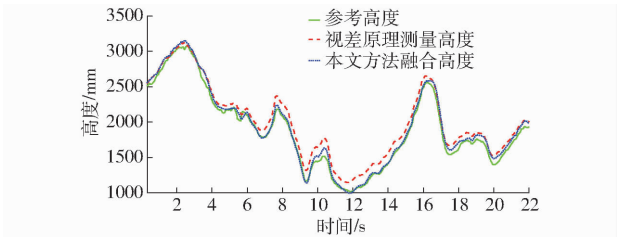


图 12 卡尔曼滤波数据与激光测高对比
Fig. 12 Comparison of filtering data with LiDAR data

表 2 为视差原理测量值、本文方法融合高度与参考高度误差的分析。利用本文方法估计无人机高度时,绝对平均误差为 46.8 mm,标准差为 38.2 mm。结果显示本文方法可有效提高无人机高度估计精度。

表 2 高度误差分析
Tab.2 Height error comparison before and after filtering

参数	视差原理测量	本文方法
误差	-259 ~ 36	-121 ~ 92
绝对平均误差	113. 1	46. 8
标准差	50. 7	38. 2

3.3 自主仿地飞行实验

为对本文高度估计算法及高度控制器进行验证,在图 13 所示户外场地进行植保无人机自主飞行实验。其中飞行路径全长 30 m,包括 10 m 平坦区域及 20 m 15°缓坡区域。

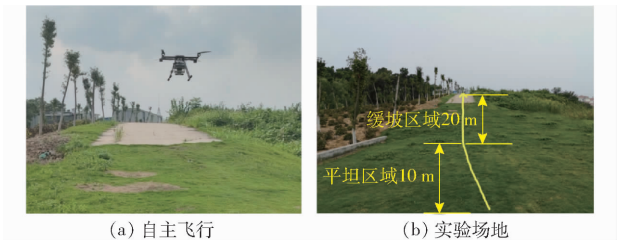


图 13 自主仿地飞行实验

Fig. 13 Autonomous flight experiment with fixed altitude

在实验过程中,设置飞行高度为 2 m,飞行速度设置为 1、2、3 m/s。以激光雷达测量数据为参考高度,以卡尔曼滤波融合毫米波雷达、气压计及 IMU 作为对比方法。在飞行速度为 1 m/s 时,飞行实验中本文方法与对比方法融合高度对比如图 14 所示。

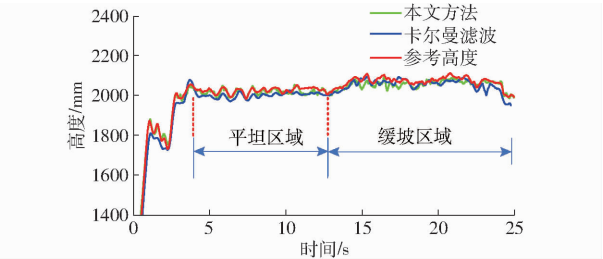


图 14 仿地飞行高度

Fig. 14 Estimated flight altitude

由图 14 可知,无人机在第 4 秒爬升到接近 2 m 高度并开启高度调节,在 4 ~ 13 s 区间为平坦区域定高飞行,在 13 ~ 25 s 区间为缓坡区域的仿地飞行。在平坦区域定高飞行时,本文方法较对比方法的高度估计表现更好,能够以更小的误差估计无人机实时高度;在 15°缓坡区域仿地飞行时,本文提出的融合立体视觉估计高度的方法能够较好估计无人机高度,因双目视觉获取的信息更丰富,可对检测区域进行自适应选择,因此本文方法在高度变化的细节上较对比方法好。

表 3 为本文方法分别在悬停和速度为 1、2、3 m/s 状态下对无人机进行自飞行实验的高度估计误差。从表 3 可以看出,本文方法在不同速度的高度估计平均绝对误差小于 20 mm,标准差小于 30 mm,均小于对比方法。因此本文方法对无人机高度估计精度更高,整体优于对比方法。

表 3 高度估计误差

Tab. 3 Height estimation error

飞行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	方法	误差/mm	平均绝对 误差/mm	标准差/ mm
0 (悬停)	卡尔曼滤波	-42 ~ 54	19.9	14.8
	本文方法	-40 ~ 43	12.0	13.5
1	卡尔曼滤波	-25 ~ 79	21.0	13.7
	本文方法	-16 ~ 60	13.5	12.2
2	卡尔曼滤波	-64 ~ 74	9.5	22.2
	本文方法	-53 ~ 59	7.7	18.0
3	卡尔曼滤波	-122 ~ 45	8.3	39.8
	本文方法	-69 ~ 90	3.8	23.2

植保无人机自主飞行时的高度控制误差如表 4 所示。分析可得,无人机在不同地况(平坦区域和 15°缓坡区域)、不同速度(1 ~ 3 m/s)下飞行时高度控制平均绝对误差小于 30 mm,高度控制标准差小于 30 mm,控制性能良好、满足一般植保作业需求。

表 4 高度控制误差

Tab. 4 Height control error

飞行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/mm	平均绝对 误差/mm	标准差/mm
0(悬停)	-25 ~ 22	7.4	8.9
1	-65 ~ 28	17.1	18.4
2	-59 ~ 46	21.8	23.8
3	-37 ~ 76	26.9	22.5

4 结论

(1)设计了搭载多传感器的植保无人机仿地飞行控制系统,并实现了各单元间的无线通信链路,整个系统运行正常,通信稳定。

(2)提出了基于多速率卡尔曼滤波融合立体视觉的无人机高度估计算法。首先根据无人机的高度及姿态变化对检测区域进行自适应选择,然后使用多速率卡尔曼滤波对视觉测距信息、气压计及 IMU 信息进行融合,提高了植保无人机对地高度估计精度。

(3)针对高度控制设计了带前馈比例控制的两级控制器,并对本文的高度估计算法和仿地飞行方法进行了验证。结果表明,本文方法在遥控模式和自主飞行模式均能准确估计无人机对地高度,并在平坦区域、15°缓坡区域均能达到较好的仿地飞行效果。

(4)由遥控飞行实验与自主飞行实验对比可知,本文方法在平坦地面和渐变式斜坡表现良好,在无人机高度显著变化时高度估计的平均绝对误差、标准差分别为 46.8 mm 和 38.2 mm,虽有增长,仍能满足一般植保作业需求。后续将针对本文方法在高度快速变化场景下的优化进行研究。

参 考 文 献

[1] JIN Yucheng, LIU Jizhan, XU Zhujie, et al. Development status and trend of agricultural robot technology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(4):1-19.

[2] 李继宇,胡潇丹,兰玉彬,等. 基于文献计量学的 2001—2020 全球农用无人机研究进展[J]. 农业工程学报,2021, 37(9):328-339.

LI Jiuyu, HU Xiaodan, LAN Yubin, et al. Research advance on worldwide agricultural UAVs in 2001—2020 based on bibliometrics[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):328-339. (in Chinese)

[3] 王大帅,张俊雄,李伟,等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(5):86-93.

WANG Dashuai, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):86-93. (in Chinese)

[4] CHEN H, LAN Y, FRITZ B K, et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(1):38-49.

[5] ZHANG Songchao, XUE Xinyu, CHEN Chen, et al. Development of a low-cost quadrotor UAV based on ADRC for agricultural

- remote sensing[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4):82–87.
- [6] 钟光跃,杨敏,于小军,等. 无人机技术在杂交水稻制种中的应用[J]. 杂交水稻,2021,36(6):26–29.
ZHONG Guangyue, YANG Min, YU Xiaojun, et al. Application of the technologies of unmanned aerial vehicle in hybrid rice seed production[J]. Hybrid Rice, 2021, 36(6): 26–29. (in Chinese)
- [7] LIU X, ZHANG W, FU H, et al. Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3):35–42.
- [8] 田志伟,薛新宇,徐阳,等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J]. 农业机械学报,2021,52(1):40–48.
TIAN Zhiwei, XUE Xinyu, XU Yang, et al. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):40–48. (in Chinese)
- [9] JOSÉ A C G, OSCAR S P, JESUS D L M. Observer-based super twisting design: a comparative study on quadrotor altitude control[J]. ISA Transactions, 2021, 109:307–314.
- [10] 王志翀, ANDREAS Herbst, JANE Bonds, 等. 植保无人机低空低量施药雾滴沉积飘移分布立体测试方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4):54–62.
WANG Zhichong, ANDREAS Herbst, JANE Bonds, et al. Stereoscopic test method for low-altitude and low-volume spraying deposition and drift distribution of plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 54–62. (in Chinese)
- [11] 臧英,吴海添,周志艳,等. 植保无人机仿地定高飞行控制技术的应用现状及展望[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2):250–256.
ZANG Ying, WU Haitian, ZHOU Zhiyan, et al. Terrain following technology of unmanned aerial vehicle for plant protection: a review[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(2):250–256. (in Chinese)
- [12] YANG Yuan, HUANG Yongjiang, YANG Haoran, et al. Real-time terrain-following of an autonomous quadrotor by multi-sensor fusion and control[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3):1065.
- [13] SAUL A, VICTOR B, NILS B. Bio-inspired autonomous visual vertical and horizontal control of a quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. Electronics, 2019, 8(2):184.
- [14] 周志久,闫建国,陈鹏. 一种小型无人机高度测量方法的研究与实现[J]. 测控技术, 2008, 27(11):92–94, 96.
- [15] 王珣,李小民. 高精度小型无人机气压高度测量系统的设计[J]. 测控技术, 2012, 31(2):12–15, 19.
- [16] 茹滨超,鲜斌,宋英麟,等. 基于气压传感器的无人机高度测量系统[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊2):94–97.
RU Binchao, XIAN Bin, SONG Yinglin, et al. An altitude measurement unit for micro unmanned aerial vehicles based on barometer[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(增刊2):94–97. (in Chinese)
- [17] YANG L, FENG X, ZHANG J, et al. Multi-ray modeling of ultrasonic sensors and application for micro-UAV localization in indoor environments[J]. Sensors, 2019, 19(8):1770.
- [18] ROUVEURE R, FAURE P, MONOD M O. PELICAN: panoramic millimeter-wave radar for perception in mobile robotics applications, Part 1: principles of FMCW radar and of 2D image construction[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 81:1–16.
- [19] 程曼,蔡振江, NING Wang, 等. 基于地面激光雷达的田间花生冠层高度测量系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):180–187.
CHENG Man, CAI Zhenjiang, NING Wang, et al. System design for peanut canopy height information acquisition based on LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 180–187. (in Chinese)
- [20] 徐梦溪,陆云扬,谈晓珊,等. 固态激光雷达传感器技术及无人机载测深应用[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15):89–96.
XU Mengxi, LU Yunyang, TAN Xiaoshan, et al. Solid-state LiDAR sensor technology and bathymetry application of UAV[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15):89–96. (in Chinese)
- [21] IGOR C, ERICKSON N, GUSTAVO F, et al. A height estimation approach for terrain following flights from monocular vision[J]. Sensors, 2016, 16(12):2071.
- [22] 李志敏,赖际舟,贾文峰,等. 一种改进的 UAV 高度无缝融合导航方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(3):22–24, 29.
LI Zhimin, LAI Jizhou, JIA Wenfeng, et al. A modified seamless height fusion navigation method of UAV[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(3): 22–24, 29. (in Chinese)
- [23] 王东,范叶满,薛金儒,等. 基于 GNSS 与视觉融合的山地果园无人机航迹控制[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4):20–28.
WANG Dong, FAN Yeman, XUE Jinru, et al. Flight path control of UAV in mountain orchards based on fusion of GNSS and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):20–28. (in Chinese)
- [24] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82D:35–45.
- [25] 邹强,付超,莫申童. 基于卡尔曼滤波的四轴飞行器成像、惯性和高度组合导航[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1):1–7.
ZOU Qiang, FU Chao, MO Shentong. Imaging, inertial and altitude integrated navigation for quadrotor based on Kalman filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1):1–7. (in Chinese)
- [26] GENG Keke, CHULIN N A. Applications of multi-height sensors data fusion and fault-tolerant Kalman filter in integrated navigation system of UAV[J]. Procedia Computer Science, 2017, 103:231–238.
- [27] 吴开华,孙学超,张竞成,等. 基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6):17–23.
WU Kaihua, SUN Xuechao, ZHANG Jingcheng, et al. Terrain following method of plant protection UAV based on height fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):17–23. (in Chinese)
- [28] 王大帅, LIU Xiaoguang, 李伟, 等. 基于多传感器融合的无人机精准自主飞行控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12):98–106.
WANG Dashuai, LIU Xiaoguang, LI Wei, et al. Precision autonomous flight control method of UAV based on multi-sensor integration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 98–106. (in Chinese)
- [29] MAGDI S M, MUHAMMAD F E. State estimation with asynchronous multi-rate multi-smart sensors[J]. Information Sciences, 2012, 9–6:15–27.
- [30] KORDESTANI M, DEGHANI M, MOSHIRI B, et al. A new fusion estimation method for multi-rate multi-sensor systems with missing measurements[J]. IEEE Access, 2020, 8:47522–47532.