

文章编号 1004-924X(2017)增-0151-09

多传感器融合的无人机动态自主着陆系统

张桢浩, 孙 伟*, 赵春宇

(西安电子科技大学 空间科学与技术学院, 陕西 西安 710118)

摘要: 为了实现无人机在无 GPS 信号下的引导和高精度动态自主着陆, 提出了一种多传感器融合的无人机动态自主着陆系统。首先该系统使用超宽带(Ultra Wideband, UWB)设备对无人机三维定位, 利用定位信息将其引导至着陆标签附近; 接着利用视觉处理算法快速精确解算出无人机和着陆标签的相对三维信息; 然后分析了着陆标签的动态匀速模型后, 利用卡尔曼滤波预估和矫正水平方向上的视觉信息, 提升着陆精度, 最后基于位置控制的 PID 控制器利用滤波后的相对三维信息, 实现无人机的高精度动态自主着陆控制。实验结果表明: 无人机能被准确引导至着陆标签附近, 着陆精度在 5 cm 之内。基本解决了无人机在无 GPS 信号下的引导问题, 满足动态自主着陆的高精度要求。

关键词: 无人机; 动态着陆; 计算机视觉; UWB 引导; 传感器融合

中图分类号: V279; TP394.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0151

Multi-sensor fusion UAV dynamic landing system

ZHANG Zhen-hao, SUN Wei*, ZHAO Chun-yu

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710118, China)

* Corresponding author, E-mail: wsun@xidian.edu.cn

Abstract: In order to achieve the UAV without GPS guidance and high-precision dynamic landing, a dynamic and autonomous landing system for UAVs with multi-sensor fusion was established. UWB (Ultra Wideband) equipment was used to achieve three-dimensional positioning of UAVs, the landing near the label was guided by using position information. Then the visual processing algorithm was designed to quickly and accurately calculate the relative three-dimensional information of the UAV and landing label. Then, after analyzing the dynamic uniform model of the landing tag, Kalman filter was designed to estimate and correct the visual information in the horizontal direction and improve the landing accuracy. Finally, the filtered three-dimensional informations were utilized by the PID controller based on position control to realize the high-precision dynamic autonomous landing control of UAV. The experimental results show that the unmanned aerial machine can be guided to near the landing label and the landing accuracy within 5 cm. UAV in the absence of GPS signal guidance problem is resolved basically, the requirements of high precision dynamic and automatic landing is met.

Key words: UAV; dynamic landing; computer vision; UWB guided; multi-sensor fusion

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61201290); 国家自然科学基金面上项目资助项目 (No. 61671356); 中央高校基本科研业务资助项目 (No. JB161301, No. JBG161307)

1 引言

近年来,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在军事和民用情况下的应用都越来越普遍。Sarris 的研究成果^[1]描述了无人机的各种行业应用,包括搜索和救援、边境监视、通信中继、野火扑灭、灾害和应急处理、科研、农业和工业应用。其中旋翼无人机因其具有垂直起飞降落和悬停的优势,得到了更广的应用和关注^[2-3]。随着旋翼无人机部署的快速增长,对可靠的动态自主着陆技术的需求已不可避免。H. Voos^[4]等人分析了无人机的非线性模型,并提出了相应的跟踪和着陆控制设计,最后提供了着陆逻辑的仿真;J Ghommam 等人^[5]提出了一种使用视觉信息的动态自适应跟踪算法,通过仿真验证了算法的可行性,仿真着陆精度较高。虽然以上两者仿真结果令人满意,但是缺少具体的实现方案,没有实际的飞行结果。C Wang 等人^[6]使用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、声纳/气压计、加速计和 GPS 作为传感器,设计相应的飞行控制律实现了无人机的动态自主着陆,然而这种方法没有使用视觉技术,着陆精度差。根据 AlvikaGautam 等人^[7]对于无人机动态自主着陆技术的略述,其介绍了超过 20 项自动降落技术,涉及不同的控制器和感知模型。JIN Shaogang 等人^[8]对近年来使用视觉进行自主着陆的技术做了整理和概述,介绍了很多视觉新技术以及相关的视觉控制算法,其中许多提出的方法都有了系统实现。但是在前两者的技术概述里,均没有考虑到在视觉信息和 GPS 信号丢失情况下的无人机引导问题,存在自主着陆范围受限的缺点。

本文设计并实现了一种无人机动态自主着陆系统,将自主着陆过程划分为了利用超宽带(Ultra Wideband, UWB)设备进行无人机的粗略引导和利用视觉技术的高精度着陆两个子过程。考虑到 GPS 信号数据不精确的缺点和在复杂地段信号容易丢失的特性,本系统选择以 UWB 设备和相机作为主要传感器来实现动态自主精准着陆。实验表明该无人机系统能够融合 UWB、相机、IMU 等多种传感器实现动态自主地高精度着陆,能将最终的着陆精度控制在 5 cm 之内,同时 UWB 设备的使用扩大了无人机的自主着陆范

围,拓宽了无人机的应用场景。

2 旋翼无人机系统组成

组装成的四旋翼无人机用于验证动态自主着陆系统,同时系统的组成也考虑了飞行载重问题,旨在使旋翼无人机能够以最小的传感器支持实现自主着陆,且能保持较高的着陆精度。

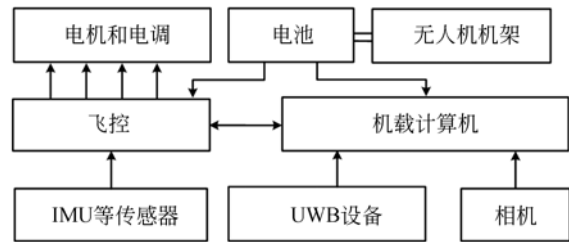


图 1 旋翼无人机硬件配置

Fig. 1 Hardware configuration of quadrotor

四旋翼无人机硬件配置如图 1 所示。飞控处理来自多种传感器的数据,包括 IMU 数据,光流传感器速度数据等,旋翼无人机的姿态控制在飞控上实现。机载计算机负责完成 3 部分功能。第一,使用 UWB 设备完成三维定位算法并根据定位信息给出引导逻辑。第二,利用视觉处理算法解算出标签相对于无人机的相对三维信息。第

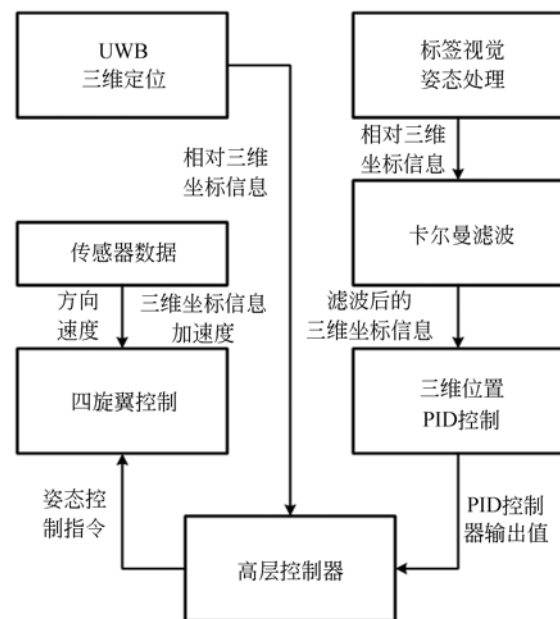


图 2 四旋翼无人机软件框架

Fig. 2 Software architecture of quadrotor system

三,对视觉三维信息的滤波和无人机的自主着陆控制。最终机载计算机将控制指令传递给低层飞控,实现飞行控制。

图 2 为系统软件的框架,接下来将会详细说明构成软件框架的每一块算法的细节。算法的实现结果将在第 4 章讨论。

3 旋翼无人机系统动态自主着陆方法

动态自主着陆方案主要分为 3 部分,第一部分是使用 UWB 设备对无人机三维空间定位,以及基于定位信息完成无人机的粗略引导。第二部分是待无人机被引导至着陆标签附近,无人机使用视角朝下的相机捕获到着陆标签的视觉信息,通过视觉处理算法计算出相机和降落标签之间的相对三维位置。第三部分是对视觉解算出的水平信息进行卡尔曼滤波,对系统状态进行预估和修正,使得视觉水平信息更平滑可靠。无人机根据滤波后的三维信息进行动态着陆控制,最终完成精准着陆。

3.1 UWB 三维定位

3.1.1 UWB 测距表示

UWB 测距采用双向飞行时间法,测距模型为:

$$dis = c \cdot (TTOT - TTAT)/2, \quad (1)$$

其中,TTOT 表示发送端发出的数据包和接收端回应的的时间间隔,接收端收到数据包并且发出回应的的时间间隔记为 TTAT, c 为电波传播速率,测距过程如图 3 所示。令 $t = (TTOT - TTAT)/2$, 测距结果简化为 $dis = c \cdot t$ 。

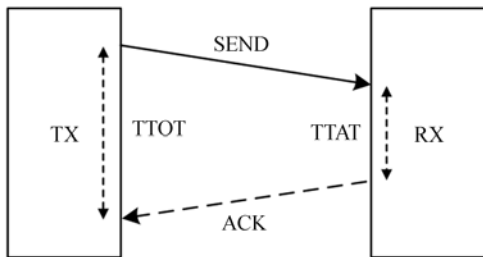


图 3 UWB 测距表示

Fig. 3 Representation of ranging

3.1.2 UWB 三维空间定位方法

移动台 UWB 设备被挂载在无人机上,当测得移动台到多个基站的到达时间(TOA),在三维坐标中移动台关于多个基站的圆方程组可由多个

TOA 值构成,构成的圆方程组表示为:

$$\begin{aligned} (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 &= c^2 t_1^2 \\ (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 &= c^2 t_2^2 \\ &\vdots \\ (x - X_m)^2 + (y - Y_m)^2 + (z - Z_m)^2 &= c^2 t_m^2 \end{aligned} \quad (2)$$

待定位的移动台(MS)的坐标设为 (x, y, z) , 每一个固定基站(BS)的坐标设为 (X_i, Y_i, Z_i) , 并假定共有 m 个固定基站, t_i 表示 MS 到达第 i 个 BS 的时间, m 代表 BS 数目,三维空间定位表示如图 4 所示。

建立如下方程:

$$\begin{aligned} R_i^2 &= (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = \\ K_i - 2X_i x - 2Y_i y - 2Z_i z + R &= c^2 t_i^2, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $K_i = X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, $R = x^2 + y^2 + z^2$, 令 $\mathbf{z}_a = [x, y, z, R]^T$, 根据上式建立以 \mathbf{z}_a 为变量的线性方程组:

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a. \quad (4)$$

则 MS 估计位置对应的误差向量为^[9]:

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0, \quad (5)$$

其中 \mathbf{z}_a^0 为 MS 的实际坐标值:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= \begin{bmatrix} R_1^2 - K_1 \\ R_2^2 - K_2 \\ \vdots \\ R_m^2 - K_m \end{bmatrix}, \\ \mathbf{G}_a &= \begin{bmatrix} -2X_1 & -2Y_1 & -2Z_1 & 1 \\ -2X_2 & -2Y_2 & -2Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -2X_m & -2Y_m & -2Z_m & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

采用加权最小二乘法^[10],用 TOA 测量值的协方差矩阵 \mathbf{Q} 近似代替误差 $\boldsymbol{\Psi}$ 的协方差矩阵,得:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_a &= \operatorname{argmin} \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a) \} = \\ &(\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h}), \end{aligned} \quad (7)$$

\mathbf{z}_a 中 (x, y, z) 即为 MS 的近似估计位置。

3.2 标签视觉姿态处理

3.2.1 视觉标签检测与相对姿态解算

当无人机被引导至着陆标签附近,相机捕获到标签的视觉信息后,要实现高精度的动态着陆,必须采用一种快速高精度的相对姿态估计方案,本文采用 apriltag 库^[11]来产生着陆标签并且完成视觉处理,视觉处理包括对着陆标签的快速检测

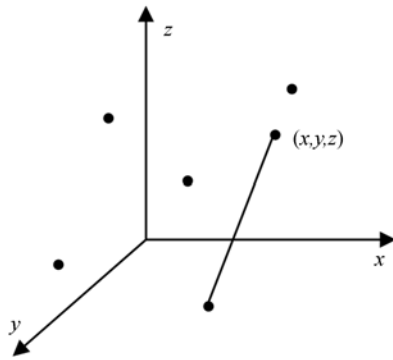


图 4 三维空间定位

Fig. 4 Three dimensional spatial positioning

和高精度的相对姿态估计。本文用于提供着陆视觉信息的标签如图 5 所示。

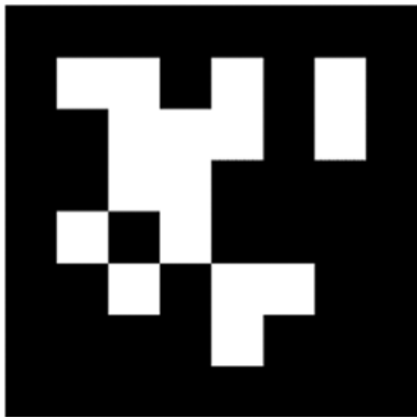


图 5 视觉检测标签

Fig. 5 Labels for visual detection

具体的视觉处理步骤如下：

- (1) 图像分割；
- (2) 边缘提取和滤波；
- (3) 视觉标签码提取；
- (4) 标签识别和误差矫正。

完成标签检测和识别后便可以得到标签的四个角点。由于标签的真实尺寸大小是已知的，相机图像上检测到的角点很容易链接到实际的角点。世界坐标系中的角点和图像中的对应角点便构成了一个 PnP 问题。假定世界参考帧中的一组 n 个 3D 点及其对应的 2D 图像投影以及校准

的固有相机参数，以相对于世界的旋转和平移的形式确定相机的 6 自由度姿态，相机的透视模型表示如下：

$$s\mathbf{p}_c = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]\mathbf{p}_w, \quad (8)$$

其中， $\mathbf{p}_w = [x \ y \ z \ 1]^T$ 是世界坐标系点， $\mathbf{p}_c = [u \ v \ 1]^T$ 是相应的图像坐标系点， \mathbf{K} 是固有的相机内部参数矩阵， s 为图像点的尺度因子， \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为相机的旋转和平移矩阵。根据构建的 PnP 问题，便解决了旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。然后根据式(8)便可以解算出 4 个角点中心在世界坐标系中的三维信息。

3.2.2 系统旋转矩阵计算

相机的坐标系与无人机刚体坐标系不重叠，当无人机使用来自相对相机的数据信息时需要进行相应的转换。无人机刚体坐标系和相机坐标系的一般刚体变换公式如下：

$${}^b\mathbf{P} = {}^b\mathbf{R}{}^c\mathbf{P} + {}^b\mathbf{O}_c, \quad (9)$$

其中， ${}^b\mathbf{P}$ 表示在相机坐标系 c 下点 p 的表示， ${}^b\mathbf{O}_c$

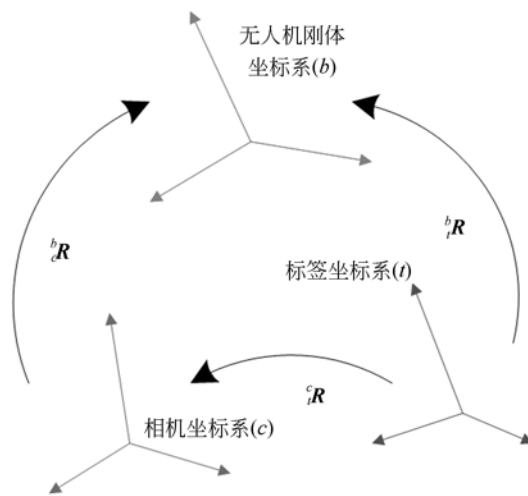


图 6 框架转换

Fig. 6 Frame transformations

为坐标平移向量，即 c 坐标原点在 b 坐标下的表示，无人机系统各个框架转换如图 6 所示。 ${}^b\mathbf{P}$ 表示在无人机刚体坐标系 b 下点 p 的表示， ${}^b\mathbf{R}$ 表示从 c 坐标到 b 坐标的旋转矩阵，如式(10)所示。

$${}^b\mathbf{R}(\varphi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

取视觉解算向量 \mathbf{p}_w 的前三个元素组成向量 ${}^c\mathbf{p}WTBX$, 带入式(9), ${}^b\mathbf{P}$ 即为标签相对于无人机的位置。

3.3 无人机动态自主着陆控制方法

3.3.1 卡尔曼滤波器设计

为了进一步提升动态着陆精度,需要在分析运动模型的基础之上,对水平视觉信息设计相应的卡尔曼滤波器,完成相应的误差矫正。假定地面上的标签是匀速的或是静止的,标签在时间域上的动态模型表示为:

$$\frac{d\mathbf{V}_T}{dt} = 0. \quad (11)$$

上式在离散时间域上表述为:

$$\mathbf{V}_{T,k} = \mathbf{V}_{T,k-1}, \quad (12)$$

其中 $\mathbf{V}_{T,k}$ 表示在时刻 k 标签在大地坐标系下的速度。通过将方程 $\mathbf{V}_{T,k} = \mathbf{V}_{B,k} + \mathbf{V}_{BT,k}$ 带入上式,得到:

$$\mathbf{V}_{BT,k} = \mathbf{V}_{BT,k-1} - \Delta\mathbf{V}_B, \quad (13)$$

其中 $\mathbf{V}_{BT,k}$ 表示为无人机相对于标签的速度。考虑到通过视觉处理能得到无人机和标签的相对三维距离,设系统的状态方程:

$$\mathbf{S}_{BT,k} = \mathbf{S}_{BT,k-1} - \Delta\mathbf{S}_{BT}, \quad (14)$$

其中, $\mathbf{S}_{BT,k}$, $\mathbf{S}_{BT,k-1}$ 分别表示 k 时刻和 $k-1$ 时刻无人机和标签的相对位置,相对位置的计算可由式(9)获得, $\Delta\mathbf{S}_{BT}$ 指的是 k 和 $k-1$ 时刻的相对位置变化量。创建如下离散卡尔曼滤波器:

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{U}_k), \quad (15)$$

$$\mathbf{Y}_k = h(\mathbf{X}_k, \mathbf{R}_k), \quad (16)$$

其中, \mathbf{X} 为滤波器的状态向量, \mathbf{U} 是状态预测方程的系统随机噪声输入向量, \mathbf{Y} 是量测向量。 \mathbf{X} 定义如下:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{S}_{BT} \quad \mathbf{V}_{BT}]^T = [x \quad y \quad v_x \quad v_y]^T, \quad (17)$$

其中,将向量 $\mathbf{S}_{BT} = [x \quad y]^T$ 和 $\mathbf{V}_{BT} = [v_x \quad v_y]^T$ 具体化为水平方向上无人机和标签之间的相对距离和相对速度。根据式(14),状态预测方程构造如下:

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{U}_k) = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{U}_k, \quad (18)$$

其中 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \Delta t \cdot \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}$ 。以视觉处理结果中的水平相对距离作为滤波器的量测向量,表示为 $\mathbf{Y} = \mathbf{S}_{BT} = [x \quad y]^T$, 所以状态量测方程构造如下:

$$\mathbf{Y}_k = h(\mathbf{X}_k, \mathbf{R}_k) = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{R}_k, \quad (19)$$

其中,量测系数矩阵 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, \mathbf{R}_k 表示量测方程的系统随机噪声输入向量。滤波具体过程^[4]不再赘述。

3.3.2 动态自主着陆控制方法

本文的控制方法采用传统的 PID 控制算法,通过将滤波后的水平视觉数据传回到 PID 控制器的输入端构成闭环反馈。该系统基于位置的 PID 控制器如图 7 所示,控制器产生相应的速度值,机载计算机以速度指令转送给飞控,无人机完成相应的飞行控制。

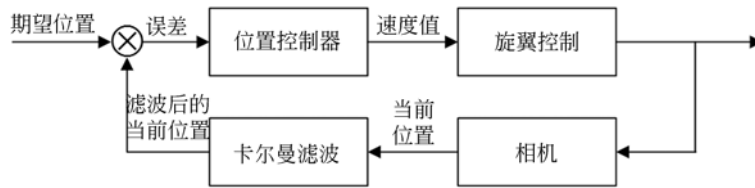


图 7 位置控制器

Fig. 7 Position controller

其中的位置环控制是标准的 PID 控制器,定义在无人机刚体坐标系下无人机和标签的坐标信息分别为 $\mathbf{p}_b = [0 \quad 0 \quad 0]^T$ 和 $\mathbf{p}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$, 以及期望的姿态误差 $\mathbf{p}_0 = [0 \quad 0 \quad h]^T, h > 0$, 因此跟踪控制系统的误差为:

$$\mathbf{e}_p(t) = \mathbf{p}_i(t) + \mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_b(t). \quad (20)$$

为了使误差收敛到零, PID 控制器设计如下:

$$\mathbf{u}_c(t) = K_p \mathbf{e}_p(t) + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}_p(t) dt + K_d \frac{d\mathbf{e}_p(t)}{dx}. \quad (21)$$

离散形式为:

$$u_{e,k} = K_p e_{p,k} + K_i \sum_{j=0}^k e_{p,j} + K_d (e_{p,k} - e_{p,k-1}), \quad (22)$$

其中 $e_{p,k} = [x_{p,k}^* \ y_{p,k}^* \ z_{p,k}^*]^T$, 表示在 k 时刻, 在无人机刚体坐标系下的相对误差。PID 控制器最终将 $e_{p,k}$ 收敛至零, 无人机稳定跟踪在着陆标签正上方。

本文所提出的动态自主着陆方法的总体框图如图 8 所示。

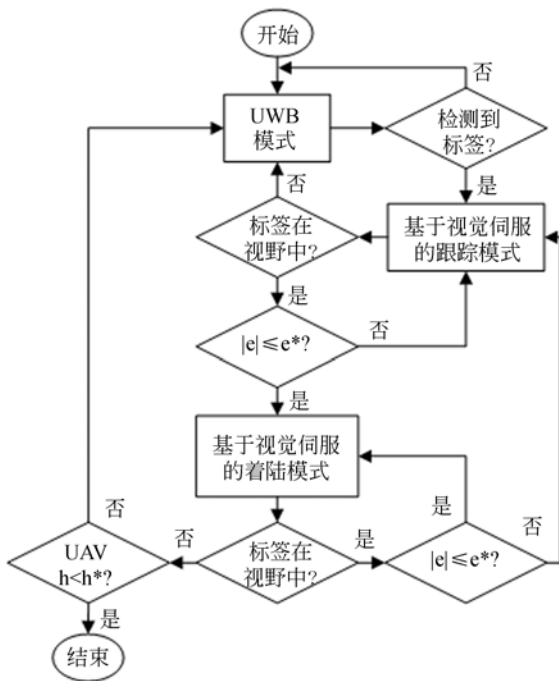


图 8 动态自主着陆流程

Fig. 8 Autonomous landing sequence



图 9 室外飞行实验环境

Fig. 9 Outdoor flight experimental environment

4.2 室外飞行过程实验数据

为了验证无人机能够完成在室外从利用 UWB 设备进行粗略引导到精准着陆的全过程。利用机载计算机上记录的飞行三维信息数据, 在

(1) UWB 模式: 当无人机距离标签较远, 视觉信息丢失。在此模式下, 将使用 UWB 设备完成无人机的定位并将其引导至标签附近;

(2) 基于视觉伺服的跟踪模式: 相机捕获到着陆标签, 启动该模式。在该模式下, 无人机刚体坐标系下的标签和无人机的相对位置误差被控制在 $(e_x \ e_y \ h)$ 之内, 即控制 xy 平面误差分别在 e_x 和 e_y 之内, h 为当前无人机的飞行高度;

(3) 基于视觉伺服的着陆模式: 该模型被启动后, 如果 xy 平面的相对误差控制在规定范围之内, 无人机将会以速度 $(0 \ 0 \ v_z)$ 向下着陆, 否则返回跟踪模式;

(4) 结束: 在着陆模式中, 当无人机丢失标签信息并且相对高度信息小于设定的米数后, 关闭桨动力, 完成着陆。如果标签丢失不是上述情况, 则返回 UWB 模式。

4 实验与分析

4.1 实验环境说明

无人机系统的硬件配置已在第 2 章说明, 检测标签长宽尺寸各为 0.38 m。相机分辨率为 640×480 , 并提供 94° 的视觉广角, 飞行过程中相机始终朝下。软件系统的构建采用 ROS (Robot Operation System), ROS 提供了卓越的通信机制以供软件模块之间传输数据和信息。最终视觉处理的速度大概在 8 Hz, 系统的延时约为 370 ms。标签以 0.3 m/s 的速度匀速移动, 整个飞行实验在室外进行如图 9。

matlab 上重构了飞行的三维图, 如图 10 所示。无人机从起飞点起飞, 然后进入使用 UWB 引导的过程, 当获得视觉信息后, 便进入视觉动态着陆的过程, 然后跟随移动标签完成动态着陆。

4.2.1 卡尔曼滤波性能

对着陆过程中视觉处理算法解算的 xy 平面数据进行卡尔曼滤波,如图 11 所示。选取飞行着

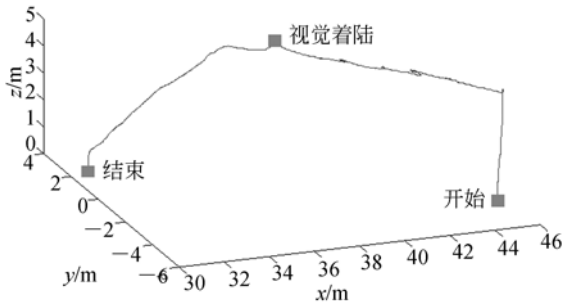


图 10 室外飞行三维图

Fig. 10 Outdoor flight three-dimensional map

陆过程中的一组视觉处理算法后的水平数据做分析,图中的红色波形为原始数据,蓝色波形为滤波后的数据,加入滤波算法后,数据幅度变化变小,波形更平滑,提升了着陆精度。

4.2.2 动态自主着陆实验结果

为了说明本系统能够实现高精度的动态着陆,在室外重复了 20 个动态自主着陆动作,标签以 0.3 m/s 匀速运动,由于没有运动捕捉系统,以滤波处理后的视觉检测信息作为着陆的水平误差。图 12~13 分别为三组动态着陆过程中 X-Z 视角和 Y-Z 视角的数据记录。着陆的误差记录如表 1 所示。实验结果表明无人机能够完成动态自主着陆,而且着陆精度在 5 cm 之内。



图 11 室外飞行实验环境

Fig. 11 Outdoor flight experimental environment

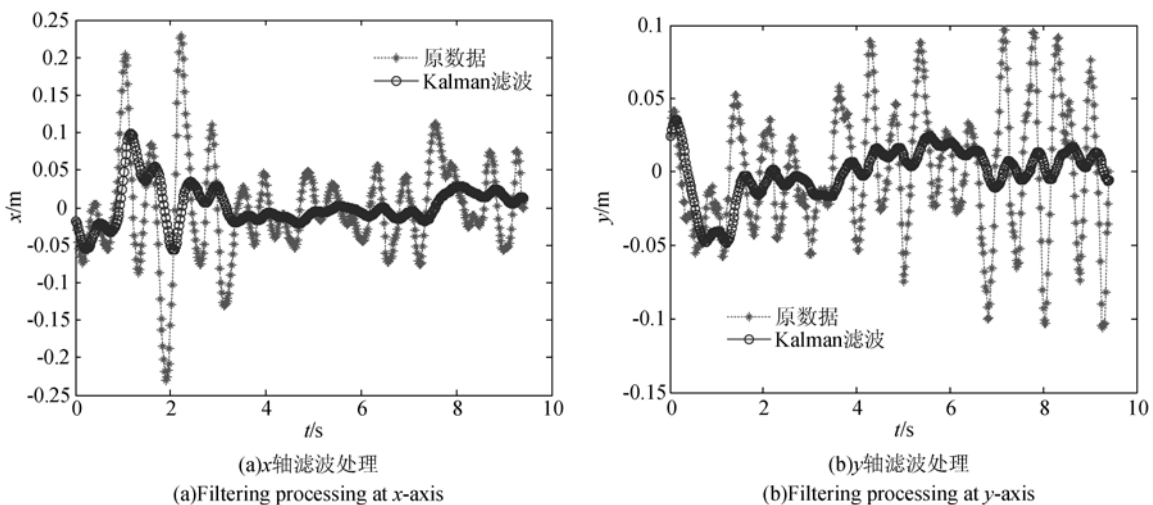


图 12 卡尔曼滤波

Fig. 12 Kalman filter

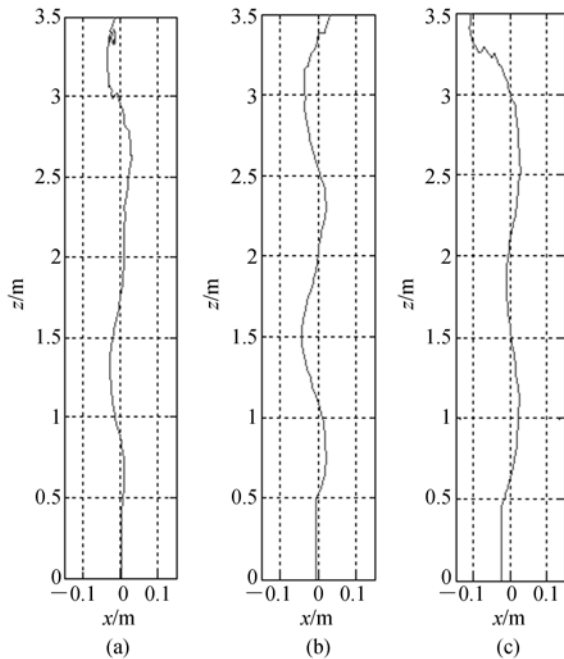


图 13 动态着陆过程 X-Z 视角

Fig. 13 Dynamic landing procedure X-Z view

表 1 动态着陆误差

Tab. 1 Dynamic landing errors (cm)

	Mean	Max	Min
X	2.994	5.60	0.33
Y	2.779	8.50	0.12

5 结 论

本文以 UWB 设备和相机作为主要传感器,将自主着陆过程分为了粗略引导和精准着陆两个子过程。当无人机丢失视觉信息,并且没有 GPS

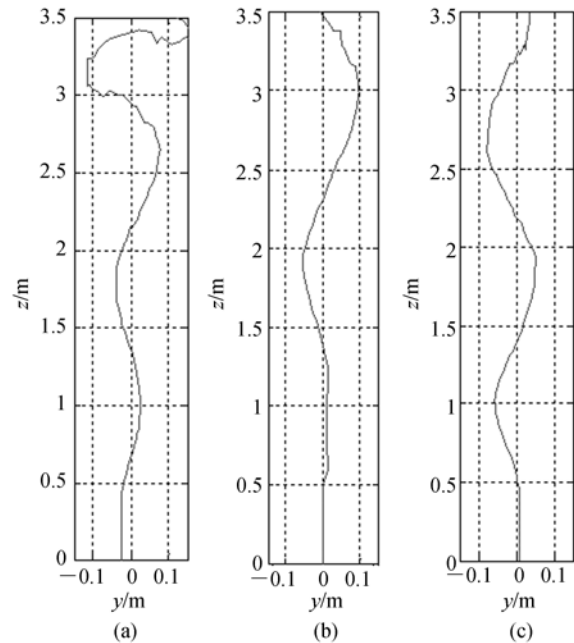


图 14 动态着陆过程 Y-Z 视角

Fig. 14 Dynamic landing procedure Y-Z view

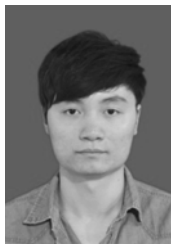
信号的情况下,UWB 设备能够定位无人机,系统利用定位信息将无人机粗略引导至标签附近。UWB 设备的使用有效解决无人机在丢失 GPS 信号无法引导的问题,拓宽了无人机的应用场景。采用以相机为传感器的视觉处理技术大大提高了着陆精度。实验表明该系统成功完成了从引导到动态自主着陆的全过程,着陆精度能控制在 5 cm 之内,较传统未使用视觉辅助的着陆方法^[12],将米级的着陆精度提升到了厘米级,同时在着陆范围上也有了较大提升。该系统的着陆精度和着陆标签的移动速度有较大关系,如何提高在快速移动标签上的着陆精度有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SARRIS Z. Survey of UAV applications in civilmarkets [C]. *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2012: 283-288.
- [2] 李劲澎,姜挺,肖达,等. 基于关系图的无人机影像三维重建[J]. *光学精密工程*, 2016, 24 (6): 1501-1509.
LI J P, JIANG T, XIAO D, *et al.*. On diagram-based three-dimensional reconstruction of UAV image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (6): 1501-1509. (in Chinese)
- [3] 徐东甫,白越,宫勋,等. 多旋翼无人机在变控制量下的三轴磁罗盘校正[J]. *光学精密工程*, 2016, 24 (8): 1940-1947.
XU D F, BAI Y, GONG X, *et al.*. Correction of 3-axis magnetic compass in multi-rotor UAV under variable control amounts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (8): 1940-1947. (in Chinese)
- [4] VOOS H, BOU-AMMAR H. Nonlinear tracking and landing controller for quadrotor aerial robots [C]. 2010 *IEEE International Conference on Control*

- Applications*, 2010, 58 (8):2136-2141.
- [5] GHOMMAM J, SAAD M. Autonomous Landing of a Quadrotor on a Moving Platform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2017: PP (99) :1-1.
- [6] WANG C, LI W, CHEN W, *et al.*. Autonomous landing control of quadrotor UAVs[C]. *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation*, 2015 :276-280.
- [7] GAUTAM A, SUJIT P B, SARIPALLI S. A survey of autonomous landing techniques for uavs [C]. 2015 *IEEE International Conference on Unmanned Aircraft System*. 2015: 1210-1218.
- [8] JIN S, ZHANG J, SHEN L, *et al.*. On-board vision autonomous landing techniques for quadrotor: A survey [C]. *Chinese Control Conference*, 2016 : 10284-10289.
- [9] 邓平, 李莉, 范平志. 一种 TDOA/AOA 混合定位算法及其性能分析[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(6):633-636.
- DENG P, LIU L, FAN P Z. A hybrid TDOA/AOA location algorithm and its performance analysis [J]. *The Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(6):633-636. (in Chinese)
- [10] 张保峰, 刘同佩, 韩燕. 基于 TOA 的三维空间定位算法研究[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 14: 3364-3366.
- ZHANG B F, LIU T P, HAN Y. 3-Dimension location algorithm research based on TOA [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 14: 3364-3366. (in Chinese)
- [11] Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system [C]. 2011 *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011*. 2011:3400-3407.
- [12] WELCH G, BISHOP G. An Introduction to the Kalman Filter[J]. *University of North Carolina at Chapel Hill*, 1995, 8 (7) :127-132.

作者简介:



张桢浩(1993—),男,浙江湖州人,硕士,主要从事计算机视觉和无人机应用开发的研究。E-mail:741788769@qq.com



孙伟(1980—),男,安徽砀山人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高性能视觉信息计算和嵌入式系统设计。E-mail:wsun@xidian.edu.cn