

四旋翼无人机自主移动降落方法研究

贾配洋^{1,2} 彭晓东¹ 周武根^{1,2}

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)¹ (中国科学院大学计算机与控制学院 北京 100190)²

摘 要 近年来,四旋翼无人机在自主完成各种复杂任务中扮演着愈发重要的角色。移动降落技术是无人机智能处理系统的关键技术,包含 3 个环节:目标检测、目标跟踪、位置预估及降落。提出了一种基于 Apriltags 的跟踪降落算法,提升了识别性能,通过 Kalman 滤波及拟合函数等方法预估运动目标轨迹,采用 PID 算法控制无人机稳定飞行、快速响应,实现了无人机对移动目标的智能识别、稳定跟踪及移动降落。

关键词 目标跟踪,移动降落,Apriltags,Kalman 滤波,拟合函数,PID

中图法分类号 TP249 **文献标识码** A

Research on Autonomous Landing of Quad-rotor UAV

JIA Pei-yang^{1,2} PENG Xiao-dong¹ ZHOU Wu-gen^{1,2}

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)¹

(College of Computer and Control, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)²

Abstract In recent years, quad-rotor UAV plays an increasingly important role. Autonomous landing is the key technology for UAV's intelligence processing system, and it has three main steps: target detection, target tracking, position prediction and landing. In this paper, the improved Apriltags algorithm was used to get target's 3D position and attitude in real time. PID algorithm and Kalman filtering were used to make the UAV's flying more stable and its responding more quickly. Fitting function was used to predict the UAV's flying path. In conclusion, the method realizes the UAV's intelligent recognition, stable tracking and autonomous landing for moving target.

Keywords Target tracking, Autonomous landing, Apriltags, Kalman filter, Fitting function, PID

近年来,无人机由于机动性好、成本低廉、飞行姿态易控制等优点,在军事和民用领域得到了广泛应用^[1]。其中,无人机结合计算机视觉的研究成果^[2],相继在视频监控、智能交通、灾后搜救、情报搜集、影像拍摄等场景被应用。通过无人机机载摄像头实现对移动目标的识别与跟踪,并在快速移动平台上移动降落,对推广无人机应用具有重要的应用价值。

无人机的移动降落涉及到了计算机视觉、控制、轨迹预估等知识^[3],存在技术难度高、定位精度差、控制响应延时、处理速度慢等问题^[4-5]。无人机需快速识别移动目标,获取目标三维位姿信息,实现稳定跟踪,并不断靠近目标,进而移动降落。本文针对无人机移动降落过程中的识别、跟踪及降落技术进行了研究,旨在寻找一种自主智能移动降落的方法。

1 基本原理

1.1 目标识别与跟踪

帧差法、均值漂移算法(MeanShift)、连续自适应 MeanShift 算法(CamShift)、光流法、TLD(Tracking-Learning-Detection)是常用的移动目标识别与跟踪方法^[6-11]。上述方法的优缺点如表 1 所列。

上述方法均存在缺点,不能满足本文移动降落的需求。本文针对移动降落任务需求对 Apriltags 算法^[12]进行改进,实时提取目标距离无人机的三维位置及姿态信息,提升了处理性能,满足了目标识别与跟踪任务需求。

表 1 目标识别与跟踪算法的优缺点

方法	优点	缺点
帧差法	计算量小,速度快	应用场景固定
MeanShift	计算简单,易于实现	小或快速移动目标不适用
CamShift	可以自适应地调整目标区域	背景区分度低时效果差
光流法	包含目标运动三维信息	计算量巨大,实时性差
TLD 算法	可长时间跟踪单一目标,具备重检测功能	实时性略差,缺乏三维信息

1.2 Apriltags 识别算法

Apriltags 数据量小,其特征易于提取,主要包含 16h5, 25h9, 36h11 3 种类型。Olson 教授提出的 Apriltags 识别算法可快速识别出类型及其 ID,并解算出目标与相机之间的三维位置 (x, y, z) 及姿态(Roll, Pitch, Yaw)数据^[12]。算法识别精度高,受光线、角度等因素的影响小,不同的码存在一定的识别距离^[13]。Apriltags 算法集成度高、可靠性强,但处理速度较慢。使用大疆 Manifold 计算机处理 1280×720 视频流时,速度约为 10 frame/s,达不到实时需求。

针对上述问题,需对算法进行改进,主要存在两种提速策略:1)改变搜索策略,从全局搜索转为局部搜索;2)降低视频流分辨率。改变搜索策略需加入位置预估,并限制识别距离,太近容易导致区域搜索提速策略失效。降低分辨率,将会影响算法识别距离。因此,在较远时,采用局部搜索来提升速度;在较近时,采用降低分辨率来提升速度。

本文受军委装备发展部领域基金(6140001010216ZK24001)资助。

贾配洋(1992—),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究方向为计算机视觉、无人机应用,E-mail: dzyjipy@126.com;彭晓东(1981—),男,博士,研究员,主要研究方向为系统仿真、计算机图形学、无人机;周武根(1987—),男,博士生,主要研究方向为 SLAM、机器人导航。

1.3 Kalman 滤波

卡尔曼(R. E. Kalman)教授提出的卡尔曼滤波,可以预估运动目标下一时刻的状态^[14]。卡尔曼滤波利用状态方程和量测数据对系统状态进行最优估计。将目标跟踪问题抽象成一个离散控制过程系统,其状态方程和量测方程分别为:

$$X(k)=AX(k-1)+BU(k)+W(k) \quad (1)$$

$$Z(k)=HX(k)+V(k) \quad (2)$$

卡尔曼滤波器结合协方差矩阵来估算系统的最优位置。卡尔曼滤波包含 5 个关键步骤,并以此迭代:

$$X(k|k-1)=AX(k-1|k-1)+BU(k) \quad (3)$$

$$P(k|k-1)=AP(k-1|k-1)A'+Q \quad (4)$$

$$X(k|k)=X(k|k-1)+Kg(k)(Z(k)-HX(k|k-1)) \quad (5)$$

$$Kg(k)=P(k|k-1)H'/(HP(k|k-1)H'+R) \quad (6)$$

$$P(k|k)=(I-Kg(k)H)P(k|k-1) \quad (7)$$

本文中,Kalman 滤波用于估计目标在二维图像中的位置,对 Apriltags 识别算法进行改进,从全局搜索改为局部搜索,缩小搜索空间,可大大提升识别算法的效率。

1.4 PID 控制算法

比例、积分、微分控制(PID 控制)由于简单、可靠、稳定等性能^[15],在工程中得到了广泛应用。比例环节中输出与输入误差信号成比例关系;积分环节中控制器输出与输入误差信号积分成正比关系,可消除稳态误差;微分环节中控制器输出与误差变化率成正比关系,可预测误差趋势变化,避免严重超调,从而改善系统调节动态特性。

$$x=k_{px}(x_1-x_2)+k_{ix}\int(x_1-x_2)dt+k_{dx}d(x_1-x_2)dt \quad (8)$$

本文采用 PID 控制算法,确保无人机跟踪飞行更加快速、稳定、准确。当使用距离方式控制跟踪飞行时,采用 PD 方式进行。当无人机使用速度方式控制跟踪飞行时,采用 PID 方式。当跟随目标的速度、加速度发生改变时,仍然可以实现对目标的跟踪飞行。

1.5 运动轨迹预估

若要实现无人机对运动目标的高精度跟踪,需要提取目

标偏离无人机的偏差量,并将其作为闭环系统的控制量。但运动目标状态的突变、丢失或被遮挡,容易导致偏差输入跳变,从而影响跟踪的稳定性。

本文采用拟合函数方法,结合最小二乘法,很好地解决了上述问题。当运动目标被遮挡时,使用拟合函数对运动轨迹进行拟合,推导下一时刻目标的位置和速度,从而引导无人机的跟踪飞行;当目标丢失时,无人机按照拟合轨迹继续运行;当目标再次出现时,继续识别跟踪目标,并实时更新拟合函数。

拟合函数需表征目标运动特性。中科院光电技术研究所的研究成果指出,二次函数可以表征大部分目标运动轨迹^[16],此时的拟合函数为:

$$f(x)=ax^2+bx+c \quad (9)$$

当运动目标以匀速直线运动时,拟合函数可采用一次函数拟合,效果更佳,拟合函数为:

$$f(x)=kx+d \quad (10)$$

当相机视场中无法找到 Apriltags 时,通过拟合函数插值获取控制参数,并将其传递给飞控系统,以保证无人机跟踪及降落的稳定性。

拟合函数存在 3 个或 2 个待求参数,利用实验数据构建超定方程组。采用最小二乘法求取参数,使样本数据误差平方和最小,可作为目标轨迹的最佳函数拟合匹配。

$$X\beta=y \quad (11)$$

$$\beta=(X^T X)^{-1}X^T y \quad (12)$$

矩阵 $X^T X$ 非奇异,则 β 存在唯一最优解。由于目标运动动态变化,通常采用最新的 20 组数据来更新拟合函数参数,以保证跟踪效果。

2 系统实现

2.1 坐标系构建及转换

为了实现无人机对移动目标的识别与跟踪,需要构建一套坐标系。通过坐标转换获得目标相对于无人机的精确位姿。按图 1 分别构建图像坐标系 I 、相机坐标系 C 、无人机坐标系 U 、北东坐标系 O 。

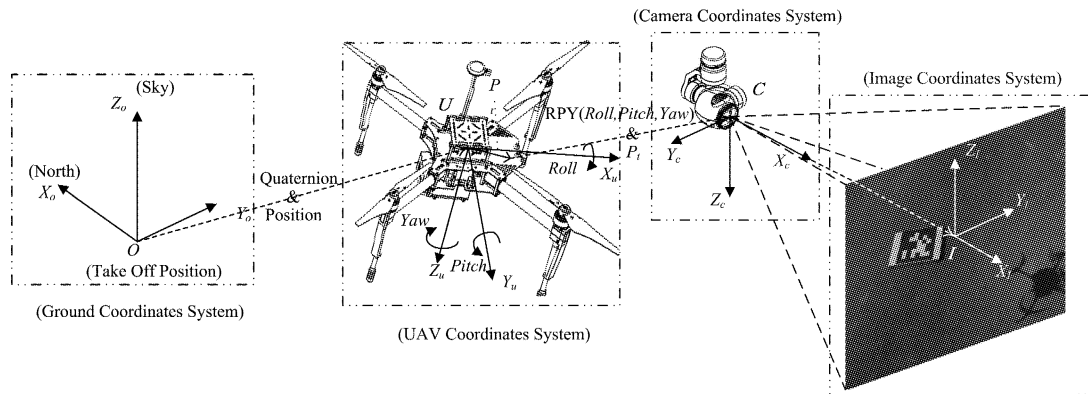


图 1 坐标系关系图

在执行整个移动降落过程的任务中,涉及到多个坐标系之间的转换。将三维坐标从原坐标系转换到目标坐标系下的坐标,需要经过平移和旋转两个步骤。 $[X_i Y_i Z_i]^T$ 为目标坐

$$R=\begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta - \sin\psi \sin\theta & \cos\psi \sin\theta + \sin\psi \sin\theta & -\sin\psi \cos\phi \\ -\cos\phi \sin\theta & -\cos\phi \cos\theta & \sin\phi \\ \sin\psi \cos\theta + \cos\psi \sin\theta & \sin\psi \sin\theta - \cos\psi \sin\theta & \cos\psi \cos\phi \end{bmatrix}$$

其坐标转换公式为:

标系下的三维坐标, $[X_s Y_s Z_s]^T$ 为原系统坐标系下的三维坐标。首先,进行平移操作, $[\Delta X \Delta Y \Delta Z]^T$ 为平移算子;其次,分别沿 3 个坐标轴 Z, X, Y 进行旋转操作,

$$[X_i Y_i Z_i]^T = [\Delta X \Delta Y \Delta Z]^T + R[X_s Y_s Z_s]^T \quad (13)$$

2.2 基于 PID 算法的跟踪制导控制律

目标在大地坐标系下的实时三维位置 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 由算法计算得出,无人机的坐标 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 由无人机上的机载 GPS、气压计等传感器融合得到。在导航系下, X, Y, Z 3 个方向轴上的飞行速度与其距离成正比,因此位置偏差 $\Delta p = (x_1 - x_2, y_1 - y_2, z_1 - z_2)$, 经过 PID 算法后的结果可作为控制无人机的飞行变量。

通过上述分析,可以建立无人机飞行器在大地坐标系下 3 个坐标轴坐标量 P 的控制量与坐标误差的相互关系。

由图 2 可知,对 Matrice100 无人机采用比例控制容易出现超调、时延等问题,难以满足跟踪要求。为了达到输入的要求,在临界状态时设定的值偏大,容易引起超调。对于响应滞后的系统,通常要加入微分项,提前预测跟踪目标变化。

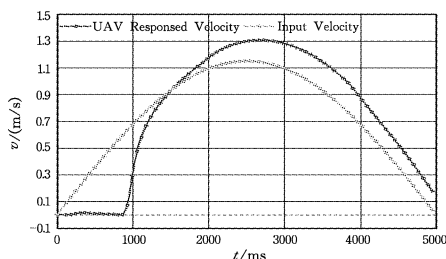


图 2 M100 速度响应曲线

根据以上分析,结合大疆开放的无人机位置和速度控制方式,对于位移控制方式,可以给出 PD 控制律,如式(14)所示:

$$P = k_p \cdot \Delta P + k_d \cdot \Delta V \quad (14)$$

其中, P 是位置输入, ΔP 是无人机与目标之间的位移差, ΔV 是无人机与目标之间的速度差, k_p 是比例项参数, k_d 是微分项参数。通过 PD 控制器,能够有效预测目标的加减速,从而提前做出加速或减速来跟踪目标,有效防止对目标跟踪过程的超调,以实现稳定的跟踪。

对于速度控制方式,相对于位置控制方式,速度控制灵敏度更高,跟踪时的反应更快,结合速度控制方式,可以给出速度的 PID 控制律如下:

$$V = k_I \cdot \Delta P + k_p \cdot \Delta V + k_d \cdot \Delta a \quad (15)$$

其中, V 是位置输入, ΔP 是无人机与目标之间的位移差, ΔV 是无人机与目标之间的速度差, Δa 是无人机与目标之间的加速度差, k_I 是积分项参数, k_p 是比例项参数, k_d 是微分项参数。

2.3 移动降落流程

2.3.1 移动降落靶标设计

本文将独特的靶标设计用于无人机移动降落任务。Apriltags 采用的是大小码结合的方式,其空间布局如图 3 所示。此靶标共包含 1 个 $39\text{cm} \times 39\text{cm}$ 的 36h11 类型 Apriltags 大码和 7 个 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 的 16h5 类型 Apriltags 小码。在整个移动降落靶标最下方,设置 36h11 类型 Apriltags 大码,用于无人机较远距离的识别、前期跟踪,并引导无人机逐渐靠近降落靶标。当无人机降落到距离靶标较近时,目标在相机视场中的占比大,影响识别速度,且目标容易脱离相机视野,导致跟踪目标丢失。

36h11 Apriltags 大码具备较远的识别能力,而 16h5 小码可计算更精确的降落位置。利用大小码相配合的方式来引导

移动降落过程,可有效改善上述问题。具体策略如下:当目标距离较近时,切换为 16h5 类型的 Apriltags($id=1$)小码进行跟踪。为进一步保证跟踪的稳定性,防止目标丢失,可设置冗余靶标信息。根据实验经验,目标更容易在前后方向丢失,故在直线方向,设置额外 4 个 16h5 Apriltags 小码(其 id 分别为 6, 4, 2, 5),彼此间间隔 5.5cm。在水平方形上,设置 2 个冗余 Apriltags(左边 $id=3$, 右边 $id=0$)。当中心靶标 Apriltags($id=1$)脱离视野,只要能够看到 6 个冗余 Apriltags 中的任意一个,即可实时计算出中心 Apriltags($id=1$)的位置,增加了跟踪、降落过程的稳定性与可靠性。

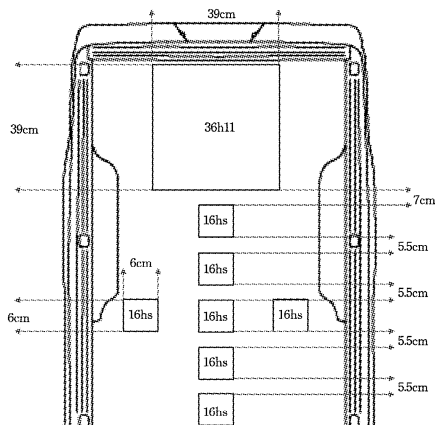


图 3 Apriltags 布局设计图

2.3.2 移动降落流程分解

无人机识别到 36h11 大码后立刻追踪过去,通过 Kalman 滤波和 PID 算法相结合的方式逐步降低至 Apriltags 上方 2m 的高度。当无人机跟踪飞行到 2m 高度时,切换成 16h5 类型的 Apriltags 小码跟踪。在一定误差范围内无人机逐渐下降,一旦脱离允许误差范围则重新调整,直至最后停在移动目标平面上,整体流程如图 4 所示。

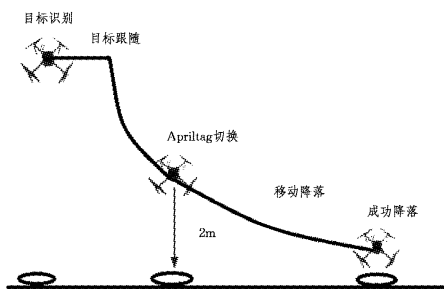


图 4 移动降落示意图

使用大码跟踪飞行时,无人机飞到码的正上方。切换成小码跟随模式后,需要时刻根据识别到 16h5 类型的小码解算降落的中心位置,并控制无人机飞往降落的中心位置。看不到目标时,使用拟合函数进行位置预估,按照预估位置坐标进行飞行降落。当无人机稳定降落到目标平台上时,无人机螺旋桨停止工作。

跟踪时采用 Kalman 滤波对 Apriltags 的位置进行预估,引入了 PID 控制算法,增加了跟踪的稳定性。执行降落任务时,使用了竖直位移控制结合虚拟遥控。降落时,当识别出无人机与标靶之间的相对高度低于某个阈值,以及水平方向相对靶标距离误差小于某个阈值时,开始开启虚拟遥控拉低油门,直至最终停止到降落平面。

3 实验

3.1 实验环境及平台

本次实验以大疆 Matrice 100 无人机为平台,在大疆 On-board SDK 实现软件的二次开发。基于 Arm 架构的机载计算机 Manifold,搭载 NVIDIA Tegra K1 处理器,主存为 2G,最高主频为 2.2GHz,操作系统为 Ubuntu14.10,OpenCV 版本为 2.4.11。云台相机为大疆 Zenmuse X3 相机,视频格式为 NV12,视频流分辨率为 1280×720 。无人机飞行仿真模拟器为 DJI Assitant。

3.2 移动目标跟踪实验

通过加入卡尔曼滤波环节,引入局部搜索代替全局搜索,当目标与无人机超过 2m 以上距离时,可以大幅提升识别速率。当距离小于 2m 时,降低视频流分辨率后,再进行目标识别、位姿解算。实验表明,本文设计的方法对于直线(30km/h)、S 弯、直角弯等情形行驶的汽车,均能实现稳定跟踪。



图 5 高速移动目标跟踪(30km/h)

表 2 算法处理速度对比分析

算法	无人机 飞行高度/m	视频分辨率	处理帧频 (frame/s)	跟踪效果
Apriltags 算法	5	4K	0.15	特别差
含 Kalman 滤波 的改进算法	5	4K	5	一般
Apriltags 算法	5	1280×720	5	一般
含 Kalman 滤波 的改进算法	5	1280×720	>50	特别好
Apriltags 算法	2	640×360	20	较好
含 Kalman 滤波 的改进算法	2	640×360	≈ 30	较好

3.3 移动降落实验

在竖直方向上,可有两种降落方式:1)采用位移控制输入飞控,则输入量是固定的相对于起飞点的绝对高度;2)采用速度控制输入飞控,则输入量是无人机竖直方向的速度控制量。

在整个识别与跟踪流程中,无人机运用 PD 算法进行位置控制、跟踪目标。低速移动降落时,采用位置控制也可实现降落在移动平面上。在较大速度的移动降落环节中,由于目标速度存在变化,为防止时延带来的影响,应运用 PID 算法进行速度控制。无人机分别成功降落在低速移动平台和时速约 30km/h 的行驶货车上。



(a)慢速移动降落



(b)高速移动降落

图 6 无人机移动降落图

3.4 实验分析

通过实验发现,Kalman 滤波的初始值离目标偏差较大,故在初始阶段不使用预估值控制无人机。从识别数据第 20 帧后,使用预估值控制无人机跟踪。PID 控制算法的控制参数需通过实验来调节,从而达到最佳控制状态。

结束语 本文针对目前跟踪算法效率低下、实时性差等问题,提出了一种基于 Apriltags 的识别跟踪降落算法,运用 Kalman 滤波,结合 PID 控制算法,通过拟合函数预估目标位置,解决了无人机移动降落的技术难题,实现了四旋翼无人机对快速移动目标的稳定识别、跟踪及移动降落。经验证,算法识别的准确率高、处理速度快、可靠性强、跟踪及降落效果佳。

算法的稳定性还可进一步提升,当前算法依赖于改进 Apriltags 识别算法提取目标位置及姿态,下一步拟采用纯视觉方法实现移动目标的识别与跟踪。

参考文献

- [1] 陶于金,李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术,2014,464(20):34-39.
- [2] ARIYUR K B, FREGENE K O. Autonomous tracking of a ground vehicle by a UAV [C]// Proceedings of the American Control Conference. 2008:669-671.
- [3] HUBBARD D, MORSE B, COLIN, et al. Performance Evaluation of Vision-Based Navigation and Landing on a Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle [C]// Proceedings of the Eighth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. 2007:5.
- [4] SAIFUDDIN SaAIF A F M, SATRIA PRABUWONO A, RASID MAHAYUDDIN Z, et al. A Review of Machine Vision based on Moving Objects; Object Detection from UAV Aerial Images [OL]. <http://www.globalcis.org/ijact/ppl/IJACT3417PPL.pdf>.
- [5] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 国防工业出版社,1998.
- [6] 吕泽华,梁虎,唐赫,等. 目标跟踪研究综述[J]. 计算机工程与科学,2012,34(10):92-97.
- [7] 胡威. 一种新的 Meanshift 快速运动目标鲁棒跟踪方法[J]. 计算机应用与软件,2014(1):140-143.
- [8] 陈金令,苗东,康博,等. 基于 Kalman 滤波和模板匹配的目标跟踪技术研究[J]. 光学与光电技术,2014,12(6):9-12.
- [9] 韩涛,吴衡,张虎龙,等. Kalman 滤波融合优化 Mean Shift 的目标跟踪算法[J]. 光电工程,2014(6):56-62.
- [10] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-Learning-Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7):1409-1422.
- [11] ZHOU Z, WU D, PENG X, et al. Object Tracking Based on Camshift with Multi-feature Fusion [J]. Journal of Software, 2014, 9(1):147-153.
- [12] OLSON E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011:3400-3407.
- [13] RICHARDSON A, STROM J, OLSON E, et al. AprilCal: Assisted and repeatable camera calibration [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013:1814-1821.
- [14] KALMAN R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J]. Journal of Basic Engtransasme, 1960, 82D(1):35-45.
- [15] 吴成富,刘小齐,袁旭. 四旋翼无人机建模及其 PID 控制律设计[J]. 电子设计工程,2012,20(16):68-70.
- [16] 徐智勇,傅承毓,王满意,等. 用拟合函数法准确预测运动目标的轨迹[J]. 光电工程,2000,27(1):17-19.