

文章编号:1005-0523(2019)03-0072-08

多旋翼无人机目标跟踪系统设计

罗伟,徐雪松,张煌军

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对多旋翼无人机对地面移动目标的跟踪问题,考虑到移动目标由于外界因素变化导致跟踪丢失等情况,以视觉相机采集地面目标的图像信息作为系统输入,采用颜色特征提取结合 TLD 目标跟踪的改进算法,用以准确稳定的跟踪目标,获得目标的位移信息。通过对位置内外环串级 PID 控制器的设计,以目标与无人机间的水平位移差作为控制器的输入,由位置姿态控制器控制电机输出实现无人机位置变换,以保证目标能够始终位于机载相机视野的中心区域附近,实现无人机对目标的自主跟踪。最后通过实验分析,验证了所设计的系统能够准确稳定的跟踪到目标。

关键词:多旋翼无人机;目标跟踪;TLD 改进算法;位置控制

中图分类号:[U8];V249.1

文献标志码:A

多旋翼无人机具有结构合理、重量轻、控制系统相对简单等优点,因而应用日益广泛。而视觉导航系统与传统的全球定位系统(GPS)^[1]、惯性导航系统(INS)^[2]和无线电导航系统(RNS)^[3]相比具有精度高、成本低、稳定性好等优势,使得其迅速应用于无人机领域。由于视觉导航技术是基于相机采集的图像信息进行处理,而图像信息包含了极为丰富且准确的信息量,使无人机能够完成更复杂、难度系数更高的任务。将无人机视觉导航技术应用于目标跟踪领域,如自主导航、目标搜索^[4-5]等场景,使无人机的应用范围得到进一步扩大。

随着视觉导航技术的发展,多旋翼无人机的目标跟踪技术得到了广泛关注。文献[6]提出了基于颜色特征提取的目标跟踪算法,针对模型的不确定性及外界扰动,引入自抗扰控制设计位置与姿态控制器。文献[7]针对无速度信息的跟踪控制问题,设计了二阶滑模的位置姿态控制器,保证在有限时间内收敛至期望姿态。文献[8]采用九宫格分割法确定目标位置,为减少数据处理负担,使用双控制器实现跟踪控制。文献[9]提出了基于色彩空间变化,利用 OpenCV 库实现图像去噪,结合 Kalman 滤波器对目标位置进行修正。文献[10]通过对高增益观测器的设计得到 UAV(unmanned aerial vehicle, 无人机)的速度与角速度的估计值,引入动态面设计控制率完成目标跟踪。

本文通过对目标跟踪系统及其软硬件结构进行设计,实现无人机对目标的长时间跟踪。针对目标运动过程中会发生如形变、遮挡与恢复、光照变化等因素导致目标跟踪丢失的情况,采用 TLD(tracking-learning-detection)目标识别跟踪算法^[11]进行目标检测跟踪。而 TLD 算法需要人为指定目标初始特征,限制了算法的应用,因此本文采用颜色特征提取结合 TLD 算法的改进方式进行目标跟踪,得到目标位移信息作为位置姿态控制器的输入。根据几何三角法完成目标定位,通过对内外环串级 PID 位置姿态控制器的设计,由位置姿态控制器控制无人机跟随目标飞行,从而实现无人机稳定快速的跟踪到目标。最后,通过实际飞行实验,验证了本设计方案的可行性。

收稿日期:2018-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(61763012)

作者简介:罗伟(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机目标跟踪。

通讯作者:徐雪松(1970—),男,教授,博士,主要研究方向为无人机导航及控制。

1 跟踪方案设计

为了实现目标跟踪功能,首先要确保无人机自身的平稳性与机动性。本设计采用开源的 Pixhawk 飞控板作为无人机的飞行控制器,保证飞行控制的稳定性与精确性,以 GPS(global positioning system,全球定位系统)模块确定无人机当前位置,利用超声波模块测出无人机飞行高度,从而获得无人机位置的三维信息。配合遥控器用于无人机的故障控制,地面站通过无线数传实时获取无人机当前数据信息做地面监测,由此完成无人机的搭建工作,飞行实现平台如图 1 所示。

在无人机稳定飞行的基础之上,机载相机通过对目标颜色特征提取结合 TLD 目标识别算法进行视觉图像采集与处理,实现目标识别跟踪,获得目标在图像坐标系下的运动,根据几何三角法得到目标在世界坐标系下的水平位移,将此相对位移通过串口传递给 Pixhawk 飞控板,由位置姿态控制器控制电机输出,从而调整无人机的位置与姿态,实现无人机的目标跟踪。

1.1 目标定位原理

目标位置的确定是基于相机对目标的捕捉,得到目标在图像坐标系 (x_c, y_c) 中的位置。而目标实际位置是在世界坐标系 (x_a, y_a) 下,因此,当获得相机焦距 f 、无人机飞行高度 l ,根据几何三角法可以确定出目标在世界坐标系下相对无人机的位置。目标定位示意如图 2 所示。



图 1 飞行实验平台

Fig.1 Aircraft experiment platform

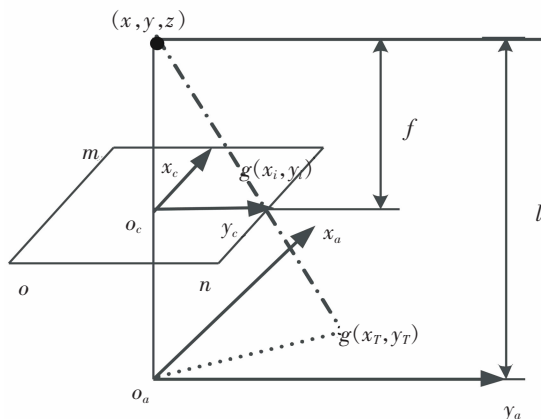


图 2 目标定位示意图

Fig.2 Map of target location

由图 2 可知,相机捕获到目标在图像平面内的像素点位置为 (x_i, y_i) ,则该点与图像平面上中点 $o_c(\frac{m}{2}, \frac{n}{2})$ 间的位移差为 $(x_i - \frac{m}{2}, y_i - \frac{n}{2})$,其中 m, n 为图像分辨率。相机焦距 f 可以由张正友标定法^[2]获得, l 为无人机设定的飞行高度值。设无人机当前位置为 (x, y, z) ,则由几何三角知识容易得出目标在世界坐标下相对无人机的位置 (x_T, y_T) 为

$$\left. \begin{aligned} x_T &= \frac{l}{f} \left(x_i - \frac{m}{2} \right) \\ y_T &= \frac{l}{f} \left(y_i - \frac{n}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将目标在世界坐标系中相对无人机的位置 (x_T, y_T) ,通过串口传递给无人机的位置姿态控制器,从而实现目标位置的确定。

1.2 目标跟踪

本文采用颜色特征提取结合 TLD 目标跟踪算法实现对目标的跟踪。首先,根据颜色特征提取获得目标特征,由 TLD 目标跟踪算法确定出目标当前位置,当目标运动时,得到目标在图像坐标系中的像素位移,由像素位移根据几何三角法得到目标在世界坐标系中的实际位移,将位移数据传递给无人机位置姿态控制器,

通过调整无人机的位置与姿态,保证目标始终位于相机视野的中心区域附近,从而达到跟踪的目的。

目标跟踪算法通常分为跟踪器与检测器两种,然而目标在运动过程中会产生如形变、遮挡与恢复、光照变化等因素使得基于某些固定特征的跟踪算法由于目标特征变化而丢失目标,即使目标再次出现也无法完成跟踪。检测算法可以对每一帧图像进行目标检测,但是需要提前对检测器进行离线训练,从而限制了目标选择的任意性。而TLD跟踪算法将跟踪器与检测器结合起来,同时加入P-N在线学习算法^[13],实时更新目标模型,保证了在外界环境因素变换的情况下,也能完成目标的跟踪。算法的整体结构如图3所示。

TLD算法主要由跟踪模块,检测模块与学习模块构成,跟踪模块的作用在于估计目标位置,检测模块用于对每一帧进行目标检测,而学习模块利用跟踪与检测模块所产生的正负样本进行P-N学习,确保检测器的精度。

1.2.1 跟踪模块

跟踪模块的作用在于跟踪目标在连续帧间的运动,由前一帧目标所在位置估计当前帧目标位置,TLD采用L-K光流法^[14]实现跟踪。首先,基本光流法是假设物体在短时间内亮度不变得得到基本光流约束方程

$$I(x, y, z) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) \quad (2)$$

$$-I_t = I_x u + I_y v \quad (3)$$

其中 $I(x, y, z)$ 为亮度值; $u = \frac{dx}{dt}$, $v = \frac{dy}{dt}$ 表示该点光流在水平与垂直方向上的速度分量。而L-K光流法是假设邻域内的光流一致,因此可联立 n 个基本光流约束方程求取 x, y 方向的速度

$$\left. \begin{aligned} I_{1x}u + I_{1y}v &= -I_{1t} \\ I_{2x}u + I_{2y}v &= -I_{2t} \\ &\dots \\ I_{nx}u + I_{ny}v &= -I_{nt} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

得到像素在水平与垂直方向上的速度分量

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n I_{ix}^2 & \sum_{i=1}^n I_{ix}I_{iy} \\ \sum_{i=1}^n I_{ix}I_{iy} & \sum_{i=1}^n I_{iy}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n I_{ix}I_{it} \\ -\sum_{i=1}^n I_{iy}I_{it} \end{bmatrix} \quad (5)$$

从而判断出物体运动信息。跟踪点的选择直接影响跟踪效果的好坏,在光流法的基础之上,提出中值流跟踪算法。通过中值流跟踪算法结合NCC(normalized cross correlation,归一化交叉相关)筛选出最优的跟踪点,提供给光流实现跟踪。通过中值流跟踪与NCC相结合的算法中得到比原跟踪点的一半还要少的点为最佳跟踪点。将这些点作为光流法的下一帧起始特征点,估计特征点的运动实现跟踪。

1.2.2 检测模块

检测模块是对每一帧图像进行检测得出目标所有可能存在的位置,结合跟踪器跟踪到的位置得出目标确切的位置。由图像元方差分类器、集成分类器和最近邻分类器组成级联分类器实现检测功能,并在检测过程中产生正负样本传递给学习模块,供学习模块学习。

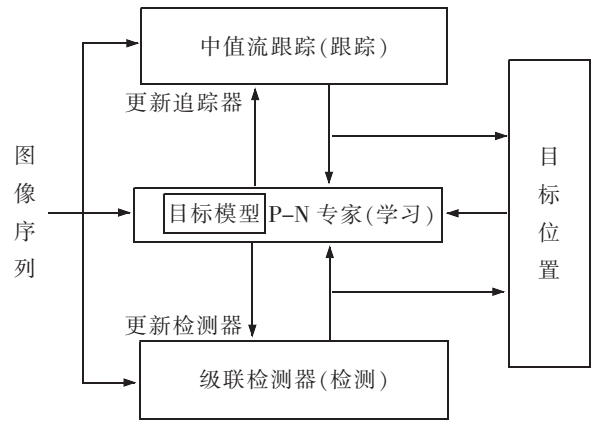


图3 跟踪算法整体结构图

Fig.3 Overall architecture of tracking algorithm

算法根据目标大小将每一帧图像分割为很多不同尺寸的图像元,图像元方差分类器是通过计算某图像元内所有像素点灰度值的方差与原有目标区域像素点灰度值的方差进行比较,将小于原目标像素灰度值方差的一半候选区域排除掉,记为负学习样本。集成分类器是由许多基本的分类器组合而成,对于每个图像元而言,当基本分类器后验概率的均值大于 50%,就判定该图像元中包含目标。基本分类器实际上是随机森林分类器^[5],同一类的多个样本经过同一个森林,得到了该类结果的分布直方图。根据选取的节点数不同,则构成不同的森林,通过选取多个森林均值,来增加分类准确度。通过上面方差分类器与集成分类器后,图像元数量大大降低了,在通过最近邻分类器得到最终的检测结果。

1.2.3 学习模块

P-N 专家机制是半监督的学习算法,它是利用带标签的样本(训练样本)与不带标签的样本(测试样本)间存在的结构性特征来训练分类器,由 P 专家与 N 专家修正分类结果。目标跟踪的过程中具有空间与时间上的结构性。时间上的结构性是指跟踪器在跟踪的过程中,目标根据跟踪器估计目标在下一帧中的位置只有一处,并且在连续帧过程中,目标运动的轨迹应该是一条平滑的轨迹线,而不会出现无法构成轨迹线的情况。此时 P 专家就是根据时间上的结构性来判别检测器是否出现分类错误的情况,如原本为正样本被检测器误分为负样本,通过 P 专家修正回正本来构成跟踪过程中的轨迹线。空间上的结构性是指由检测器与 P 专家给出的正样本中找出最可信的一个位置来保证目标只会出现在一个位置上。这个位置就是跟踪的结果并作为跟踪器的初始值。

1.3 颜色特征提取

TLD 算法需要人为指定初始目标特征,限制了算法的使用。因此本文采用颜色特征提取的方式获得初始目标特征,由于常用的 RGB 颜色空间模型容易受光照变化影响导致目标不跟随。所以本文采用 OpenCV 计算机视觉库来实现基于 HSV 颜色空间的特征提取。

首先,跟踪算法以机载相机所采集的图像信息作为系统输入,但是由于数字图像的采样的过程中容易受到噪声的干扰。因此为了进一步的对图像信息进行操作,必须对受噪图像进行中值滤波,让周围的像素值接近真实的值从而消除孤立的噪声点。在滤波后的图像处理中,HSV 颜色空间可以很准确的提取出目标的颜色特征,且对颜色的提取具有较好地鲁棒性,因此将图像的 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间模型。其转换公式如下

$$\left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & 0^\circ, \max=\min \\ & 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ, \max=r \text{ 且 } g \geq b \\ & 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ, \max=r \text{ 且 } g < b \\ & 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ, \max=g \\ & 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ, \max=b \end{aligned} \right\} h= \\ & \left. \begin{aligned} & 0, \max=0 \\ & \frac{\max-\min}{\max}, \text{其它} \end{aligned} \right\} s= \\ & v = \frac{\max}{255} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: r, g, b 为 RGB 颜色空间的各个颜色分量,其中最大值为 $\max=\max\{r, g, b\}$,最小值是 $\min=\min\{r, g, b\}$;而 h, s, v 为 HSV 颜色空间模型的各个分量。为了保证目标与背景的分度以及目标颜色特征的提取效果,选取红色作为 HSV 颜色空间提取的目标特征色,以减少背景、纹理、分辨率等影响因素对目标识别的影响。由此将相机采集的图像信息转换到 HSV 颜色空间模型中。

经过以上对图像信息的处理,得到图像在 HSV 颜色空间模型下的图像信息。所选取的红色目标特征色在 HSV 空间中的高、低阈值为[0,10]和[160,180],根据此阈值提取出满足条件的像素点。将满足高、低颜色阈值化图像合并后经过高斯滤波得到滤波后的图像信息,通过 OpenCV 计算机视觉库中轮廓提取的方式(InRange 过滤、形态学操作提取、轮廓膨胀)得到目标轮廓信息,在轮廓中铺满 10×10 个特征点,作为初始特征点,完成目标的特征提取,将此特征点传递给 TLD 跟踪算法中的跟踪与检测模块进行目标跟踪。

2 控制系统的设计

2.1 软硬件结构

本设计采用开源的 Pixhawk 飞控板作为无人机的飞行控制器,其内部集成了陀螺仪、加速度计、磁力计和气压计等传感器元件组成了双惯性测量单元(IMU),配合朗宇电机与好盈电调等组件实现基本的飞行功能的要求。由于本设计采用几何三角法完成目标的定位,因此采用 MB1242 超声波传感器来保证 Z 向高度的准确性,选用 OV2710 专用无畸变机载摄像头作为视频采集模块。图像处理模块基于 Linux 操作系统,通过 Qt Creator 编译运行目标跟踪算法得到目标位置数据,经串口发送至无人机飞控板,由此完成系统的软硬件搭建工作。

2.2 控制器的设计

通过几何三角法确定目标位置后,设计位置姿态控制器实现无人机目标跟踪。为了增加飞行器的稳定性并提高它的控制品质,本文采用内外环串级 PID 控制器实现控制。首先根据跟踪算法得到期望位置 $[x_d, y_d, z_d]$ 与无人机当前位置 $[x, y, z]$ 的位置差做外环 P 控制器的输入值得到期望速度

$$\left. \begin{aligned} v_{dx} &= K_{p1}(x_d - x) \\ v_{dy} &= K_{p2}(y_d - y) \\ v_{dz} &= K_{p3}(z_d - z) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 K_{p1}, K_{p2}, K_{p3} 为比例系数,由期望速度 $[v_{dx}, v_{dy}, v_{dz}]$ 与当前速度 $[v_x, v_y, v_z]$ 差作为内环 PID 输入值得到期望推力值 $[U_x, U_y, U_z]$,解算出期望姿态角经姿态控制器实现对电机控制。内环 PID 控制器如下所示

$$\left. \begin{aligned} U_x &= K_{pv}(v_{dx} - v_x) + K_{ix} \int_0^t (v_{dx} - v_x) dt + K_{dx} d(v_{dx} - v_x) \\ U_y &= K_{pv}(v_{dy} - v_y) + K_{iy} \int_0^t (v_{dy} - v_y) dt + K_{dy} d(v_{dy} - v_y) \\ U_z &= K_{pv}(v_{dz} - v_z) + K_{iz} \int_0^t (v_{dz} - v_z) dt + K_{dz} d(v_{dz} - v_z) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

通过以上位置姿态控制器得到电机控制量控制电机转速使无人机跟踪目标,保证目标始终位于机载相机视野中心点附近,从而达到跟踪的目的。串级 PID 控制器的总体结构如图 4 所示。

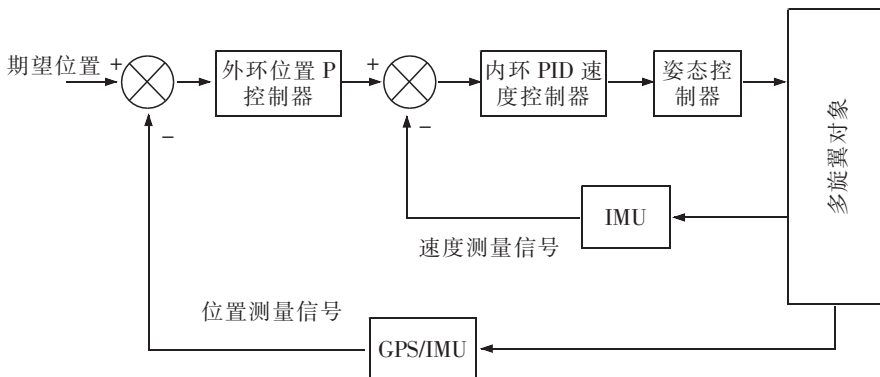


图 4 串级 PID 控制结构图

Fig.4 Structure diagram of position controller

3 实现结果与分析

3.1 跟踪飞行实验

现以自主搭建的多旋翼无人机为实验平台,验证本设计的跟踪效果。实验设定无人机当前位置为 (X,Y,Z) 实验设定 Z 向飞行高度为 1 m ,等待无人机起飞稳定并悬停在 1 m 左右的高度后,目标移动,分析无人机跟踪效果。

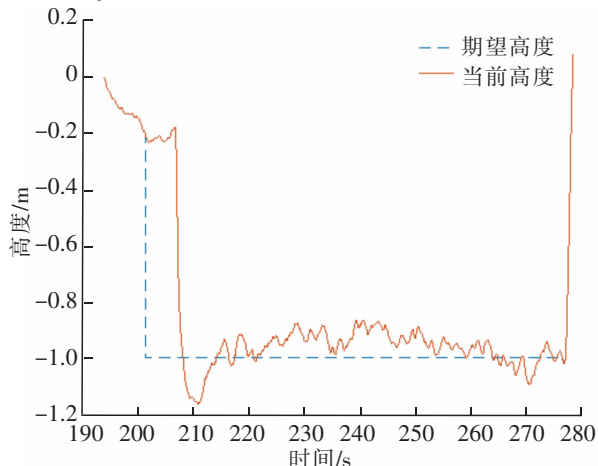


图 5 实际高度与设定高度

Fig.5 Actual height and set height

根据 Pixhawk 所记录的飞行日志,通过 Matlab 导出飞行数据结果进行分析,图 5 为无人机设定期望高度与实际飞行高度图,由于无人机采用的是北东地(N-E-D)坐标系,所以 Z 轴为负值。可以看出无人机在跟踪过程中稳定在 1 m 左右的高度,上下浮动的精度在 0.1 m 内进行跟踪飞行,符合本设计对无人机跟踪过程中飞行高度的要求。图 6 为无人机当前所处位置 (x,y) 与目标跟踪算法解算出无人机期望位置 (X,Y) 图,可以看出目标在系统运行后第 225 s 处开始运动,无人机的实际位置坐标分量 x,y 始终都在跟着目标跟踪算法所解算出的期望无人机的位置坐标分量 X,Y 变化,验证了无人机的位置跟着目标位置移动。图 7 是无人机实际跟踪过程中的飞行日志数据画出的三维跟踪图像,由三维图像可以看出,当无人机起飞稳定后,无人机的实际位置跟着期望位置运动而运动,实现了无人机对移动目标的有效跟踪。

3.2 跟踪算法验证

为了验证算法的跟踪效果,针对跟踪过程中,由于目标形变、光照变化、遮挡与恢复等因素变化,影响目标的跟踪效果做相应的实验,验证本算法的稳定性。图 8,图 9,图 10 分别展示了目标在形变,光照变化,遮挡与恢复情况下跟踪的效果。

图 8 表示目标在运动过程中,由于运动方向发生改变导致跟踪的目标图像发生形变,验证了跟踪算法即使在目标图像发生形变的情况下也能完成有效跟踪。图 9 表示目标从灰暗到明亮的光照环境变化情况下的良好跟踪效果。图 10 表示目标在运动过程中,目标被物体遮挡与再次恢复的情况下的跟踪效果。从跟踪结果可以看出,由颜色特征提取结合 TLD 的目标跟踪算法能够保证目标即使在形变、光照变化、遮挡与恢

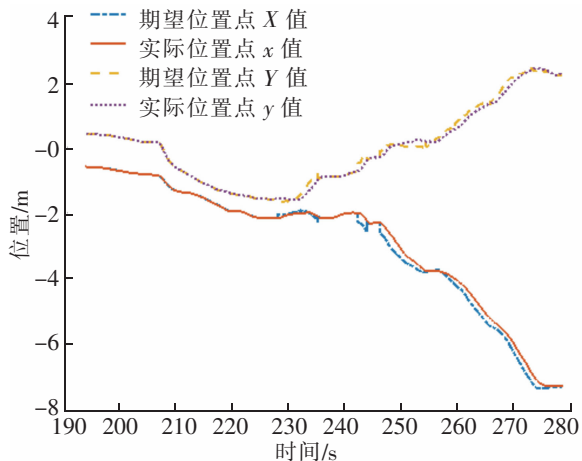


图 6 X、Y 向实际值与期望值

Fig.6 Actual value and expected value in X,Y-direction

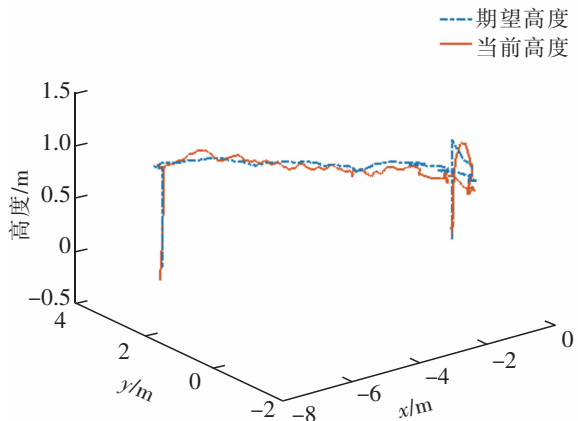


图 7 实际跟踪过程三维图像

Fig.7 Three dimensional image of actual position



图8 形变情况下目标跟踪的效果

Fig.8 Effect of target tracking in deformation condition

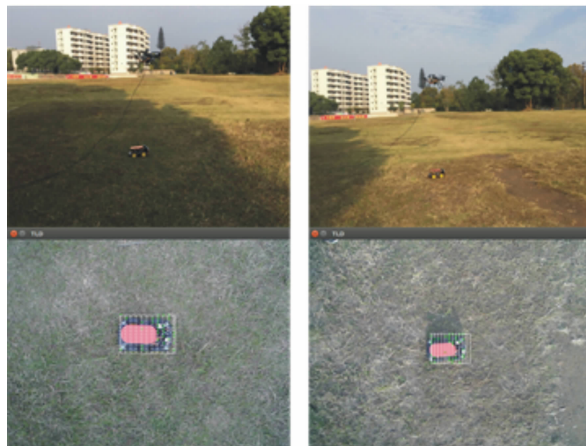


图9 光照变化情况下目标跟踪的效果

Fig.9 Effect of target tracking with illumination change

复等情况下,也能完成目标识别跟踪,保证了无人机在跟踪过程中,能够准确稳定的跟踪到目标,提高了跟踪系统的可靠性与稳定性。

4 结束语

本文完成了多旋翼无人机的目标跟踪系统设计,包含整体的设计到具体的实现过程。采用基于颜色特征提取结合 TLD 目标识别的改进算法获得目标像素位移,在通过几何三角法确定出目标在世界坐标系下的实际位移,由串口传递给 Pixhawk 无人机,经内外环串级 PID 位置姿态控制器,实现无人机位置控制,保证目标始终处于无人机相机视野中心附近,实现目标跟踪识别。并设计了一套用于实际飞行的软硬件平台,进行了跟踪飞行实验,验证了跟踪系统能够在目标形变、光照变化以及遮挡与恢复等情况下也能保证良好的跟踪特性。

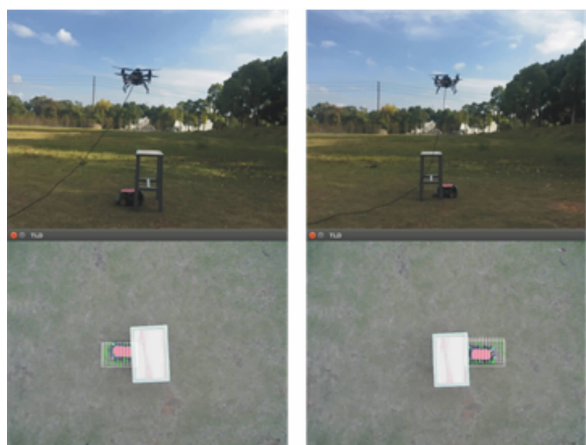


图10 遮挡与恢复的情况下目标跟踪的效果

Fig.10 Effect of target tracking under the condition of occlusion and recovery

参考文献:

- [1] 刘洪剑,王耀南,谭建豪,等. 一种旋翼无人机组合导航系统设计及应用[J]. 传感技术学报,2017,30(2):331-336.
- [2] 贾勇,秦永元,李岁芳,等. 用于短时定位的 MEMS 旋转调制惯性导航系统[J]. 传感技术学报,2018,31(6):963-968.
- [3] 李四海,辛格,付强文,等. 基于 INS/ILS/RA 组合导航的自动着陆系统[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(3):311-314.
- [4] BAI Z J,JI Y F,WU L N,et al. Indoor autonomous navigation technology research based on lidar for quad-copter aerial robot[J]. Applied Mechanics & Materials,2014,538:371-374.
- [5] XIN Z K,FANG Y C,ZHANG X B. Adaptive control for the on-board pan-tilt camera in an UAV ground-target-tracking system [J]. Control Theory & Applications,2010,27(8):1001-1006.

- [6] 韩笑,廖粤峰. 基于扰动抑制的四旋翼飞行器跟踪控制[J]. 计算机仿真,2016,33(2):111-115.
- [7] 刘锦涛,吴文海,李静,等. 无速度测量的四旋翼无人机移动目标跟踪控制[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(2):369-375.
- [8] 宗伟林,贾毅超,李国荣,等. 四旋翼无人机自主追踪系统设计[J]. 电光与控制,2018,25(3):96-97.
- [9] 张立国,李晓松,肖磊,等. 基于单目视觉的四旋翼飞行器目标跟踪算法研究[J]. 计量学报,2018,39(3):342-347.
- [10] 方旭,刘金琨. 四旋翼无人机动态面控制[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(8):1777-1784.
- [11] KALAL Z,MIKOLAJCAY K,MATAS J. Tracking-Learning-Detection[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell,2012,34(7):1409-1422.
- [12] 林冬梅,张爱华,王平,等. 张氏标定法在双目视觉脉搏测量系统中的应用[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(2):78-85.
- [13] KALAL Z,MATAS J,MIKOLAJCZYK K. P-N learning: Bootstrapping binary classifiers by structural constraints [J]. Computer Vision and Pattern Recognition,2010,238(6):49-56.
- [14] 李召龙,沈同圣,娄树理. 动态背景下的光流场计算方法[J]. 激光与红外,2017,47(1):119-123.
- [15] 李婷,赵文杰,杨帅. 基于多区域的随机藏在在线目标跟踪算法[J]. 红外技术,2016,38(11):953-959.

Design of Target Tracking System for Multi-Rotor UAV

Luo Wei, Xu Xuesong, Zhang Huangjun

(School of Electrical &Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the tracking problem of ground moving targets for multi-rotor UAV, in consideration of tracking loss of the target due to the changes of external factors, using the image information of ground target collected by the vision camera as the input of the system, this paper adopted the improved algorithm based on color feature extraction combined with TLD target tracking to ensure that the target can be tracked accurately and stably, and the displacement information can be also obtained. By the design of the internal and external ring cascade PID controller of the position, it then took the horizontal displacement difference between the target and the UAV as the input of the controller, and the motor output was controlled by the position attitude controller to realize the position change of UAV, ensuring that the target was always located near the center of the airborne camera field of vision, which realized the autonomous tracking of the UAV for target. Finally, the experimental results show that the system can track the target accurately and stably.

Key words: multi-rotor UAV; target tracking; TLD improved algorithm; position control