

基于微型飞行器机载视觉的目标识别与状态估计方法^①

张 晗^② 杨贤昭^③ 陈 洋

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 为了实时获得微型飞行器着陆时与着陆平台的相对位置关系,本文提出了一种基于微型飞行器机载视觉的目标识别与状态估计方法。该方法利用曲面拟合方法获得着陆平台图像边缘的梯度方向和亚像素坐标,并将其作为匹配信息进行相似度运算,匹配成功后再通过运动方程模拟移动平台的运动特性,利用卡尔曼滤波对移动平台下一时刻的位置进行预测。最后进行偏移量的计算,将实验所得的数据通过几何变换可以得出飞行器与着陆平台的相对位置参数。实验结果表明该算法能够实时准确计算出飞行器与视觉着陆标识之间的相对位置关系。

关键词 目标识别, 曲面拟合, 匹配相似度, 卡尔曼滤波, 偏移量

0 引 言

微型飞行器的自主降落需要快速地识别移动目标,准确获取目标三维姿态信息,对目标进行稳定的跟踪并不断靠近,最后实现移动降落。飞行器的降落需要精确的导航技术,现阶段的主流技术是 GPS 导航和 IMU 导航,技术相对比较成熟,但是单独的 GPS 导航系统无法精确地提供位置消息以及不能在室内和其他一些特定的场景进行定位,而 IMU 导航有惯性误差累积发散的缺点^[1]。

机器视觉近 10 多年的快速发展,视觉导航系统融合了激光、红外等技术,利用对图像的处理可以实现飞行器的精确自主着陆,目前国内外相关研究人员将机器视觉技术应用到一些飞行器的自主着陆中^[2]。加州大学伯克利研究小组提出通过视觉着陆算法解算出无人机与着陆平台的相对位置^[3]。宾夕法尼亚大学的研究小组采用无人机机载相机通过跟踪并测量目标物的位置与面积进而解算出无人机的相对位置和姿态信息^[4]。清华大学的刘士清

教授提出基于灭影线方法来估算无人机的姿态和位置算法^[5]。

在以上研究中,由于图像处理和识别过程比较复杂,并且存在一些外部影响因素,所以视觉着陆算法很难达到飞行器需要的精度和实时性。本文旨在寻找一种智能着陆的方法,利用机器视觉对着陆平台进行识别,在保证实时性的同时,实现飞行器对着陆平台的精确跟踪。

1 识别与跟踪算法

识别与跟踪算法主要是能够检测并识别出着陆平台的标识,解算出微型飞行器相对于着陆平台的位置信息,最后利用跟踪算法实时获得着陆平台与飞行器的相对关系并将真实的位置信息传送给飞行器控制器以达到跟踪的目的^[6]。本文利用曲面拟合原理快速推导出着陆平台的标识图像边缘梯度方向和亚像素边缘坐标,并将其作为匹配信息进行相似度计算,此算法不仅可以保证匹配的精度,还能提高算法的运行速度。

① 国家重点研发计划(2017YFC0805100)和教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放课题(MADT201602)资助项目。

② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:图像处理;联系人,E-mail: 260453415@qq.com

③ 通信作者,E-mail: yangxianzhao@wust.edu.cn

(收稿日期:2018-11-12)

图1为微型飞行器对着陆平台算法的流程图,流程图中的像素偏移量是飞行器和着陆平台标识在图像的相对位置,世界偏移量是它们在现实世界中的相对位置。与模板进行相似度匹配是检测图像中是否存在着陆平台标识,匹配成功则说明成功识别出图像中的着陆平台标识,匹配失败则说明无法识别标识或者图像中没有着陆平台标识,这时立刻从第2幅图进行检测匹配,以此循环。

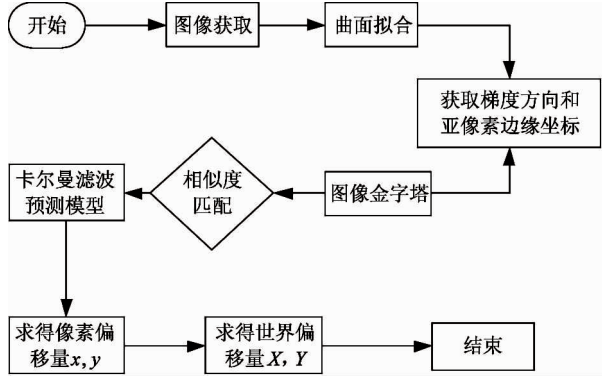


图1 目标识别与状态估计流程图

2 着陆平台的识别

着陆平台标识的识别是飞行器目标识别与状态估计中的核心环节,其识别与匹配的精确度直接影响到是否能从着陆平台标识图像中获取飞行器导航所需要的数据和精度。

2.1 相似度量函数

本文相似度量函数的计算是以着陆平台标识图像边缘的梯度向量作为匹配信息。模板通过边缘检测算法处理后,模板转换成点 $\mathbf{p}_i = (r_i, c_i)^T, i = 1, 2, \dots, n$ 组成,对应于各点有一个梯度方向的向量 $\mathbf{d}_i = (t_i, u_i)^T$ 。

经过同样的处理方法,目标图像表示为点 (r, c) 与之对应的方向向量 $\mathbf{e}_{r,c} = (v_{r,c}, w_{r,c})^T$ 。在匹配的过程中,变换后的模板与目标图像中某个特定的位置进行相似度量值的计算。模板中边缘梯度向量经变换后为 $\mathbf{d}'_i = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{d}_i$, 在图像中某个特定点 $\mathbf{q} = (r, c)^T$ 处,计算这个相似度量的等式如下:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{d}'_i{}^T \mathbf{e}_{q+p'}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t'_i v_{r+r'_i, c+c'_i} + u'_i w_{r+r'_i, c+c'_i} \quad (1)$$

由式(1)可以得到模板和子图像对应边缘点的梯度向量点积平均值。由于式(1)中方向向量是使用边缘提取算法来计算的,其方向的长短取决于图像的亮度,所以式(1)的相似度算法还是会受到光照变化的影响。为了解决这一个问题,将式(1)中的方向向量进行归一化得到式(2),经过变化后的相似度量函数不会受到任意光照变化的影响^[7]。

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{d}'_i{}^T \mathbf{e}_{q+p'}}{\|\mathbf{d}'_i\| \|\mathbf{e}_{q+p'}\|} \\ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t'_i v_{r+r'_i, c+c'_i} + u'_i w_{r+r'_i, c+c'_i}}{\sqrt{t_i'^2 + u_i'^2} \sqrt{v_{r+r'_i, c+c'_i}^2 + w_{r+r'_i, c+c'_i}^2}} \quad (2)$$

2.2 曲面拟合提取梯度方向和亚像素边缘坐标

由于摄像机拍摄的数字图像可以看作是一个离散化的空间曲面,根据某个邻域内像素的坐标及其灰度值,可以用一个高阶曲面来拟合这个空间曲面,用这样一个数学模型描述图像可以准确获得边缘梯度信息以及求取亚像素边缘坐标。

为了快速准确地提取边缘梯度向量,本文采用曲面拟合原理对边缘梯度方向进行计算,具体的推导过程如下^[8]。

3×3 邻域像素坐标, x, y 为坐标, $g(x, y)$ 用于描述灰度或梯度值,设拟合曲面参数方程为

$$G(x, y) = k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 xy + k_4 x + k_5 y + k_6 \quad (3)$$

针对上式,在 x, y 方向上求偏导,则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} = 2k_1 x + k_3 y + k_4 \\ \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} = 2k_2 y + k_3 x + k_5 \end{cases} \quad (4)$$

则点 $(1, 1, G(1, 1))$ 梯度方向在着陆平台标识图像坐标平面中的投影为

$$p(1, 1) = \begin{bmatrix} 2k_1 + k_3 + k_4 \\ 2k_2 + k_3 + k_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)即为着陆平台标识图像边缘点的梯度方向,由理论推导过程可知,采用曲面拟合方法求梯度方向计算简单,并且整个拟合过程可以看作是进行了一次高斯滤波,从而提高了算法的抗噪性。

在着陆平台标识图像坐标平面上过点(1,1),沿梯度方向,直线方程为 $y = kx - k + 1$ 。其中斜率 k 为

$$k = \frac{2k_2 + k_3 + k_5}{2k_1 + k_3 + k_4} \tag{6}$$

任意一条空间曲线都可看作为2个曲面的交线,垂直于图像坐标平面且过该直线的平面方程为:

$$kx - y - k + 1 = 0 \tag{7}$$

曲面上沿梯度方向并且经过点(1,1, $G(1,1)$)的空间曲线为

$$\begin{cases} G(x, y) = k_1x^2 + k_2y^2 + k_3xy + k_4x + k_5y + k_6 \\ kx - y - k + 1 = 0 \end{cases} \tag{8}$$

将式(8)中的变量 y 消去,得到曲线方程,再令求得的曲线方程的导数为0,计算可得曲线方程的极大值,解方程可得:

$$x = \frac{2k_2k^2 + 2k_2k + k_3k + k_5k - k_4 - k_3}{2(k_1 + k_2k^2 + k_3k)} \tag{9}$$

式(9)求得的是空间极值点的 x 坐标,将其带入式(7)即可求得 y 坐标。

2.3 停止搜索标准

在匹配过程中,需要遍历整幅图像来确定目标位置,但是有一些非目标位置的相似度量值不需要完全地求出,可以通过设置终止条件,即采用一定的阈值,让整个相似度量的运算可以提前结束,由于算法的计算量的减少,整个算法耗时也相对减少,从而可以快速定位到目标位置,提高整个算法的计算速度。用 s_j 表示累计到模板的第 j 个元素时点积的总和,当使用归一化点积总和作为匹配度量时:

$$s_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j \frac{\mathbf{d}_i^T \mathbf{e}_{q+p'}}{\|\mathbf{d}'\| \|\mathbf{e}_{q+p'}\|} \tag{10}$$

由式(10)可知,剩余 $n - j$ 项的和小于 $(n - j)/n = 1 - j/n$, 所以如果当部分和满足 $s_j < s_{\min} - 1 + j/n$ 时,匹配的相似度分值就不会达到设定的阈值 $s_{\min}$, 因此当满足上述条件时就可以在第 i 个元素后停止计算。这个停止标准在一定程度上提高了算法运行的速度。

2.4 图像金字塔

计算整个图像中的相似度量是一项相当耗时的

所以即使采用了停止标准,算法运行速度提升的比例也只是一个常数。

为了达到实时性要求,本文提出一个可以加快算法运行的搜索策略,由复杂度 $O(WHNn)$ 可知,模板匹配中计算相似度量的运行时间取决于目标图像的宽 W 和高 H 、模板边缘点个数 N 以及模板旋转的次数 n 。图像金字塔是一种由粗到精的搜索策略,采用降低整个图像的分辨率的方法可以得到目标图像的大致方位,然后在高分辨率下获得目标图像的精确位置,通过上述搜索策略即可有效地降低算法的复杂度。在构建金字塔的过程中,考虑到耗时和构建效果的问题,选择使用 2×2 的均值滤波器来平滑图像, 2×2 的均值滤波器没有频率响应的问题,它的效果相当于模拟了一个填充因素为 100% 的完美相机。这个方法的过程就是求 2×2 区域中所有像素的平均灰度值作为低分辨率那一层对应点的灰度值。

图像金字塔具体的搜索策略是首先利用穷举法让模板遍历一次金字塔中分辨率最低、最顶层的那一层图像。然后,通过设置一个合适的停止搜索标准,提高计算相识度量值时候的计算效率。最后,通过算法在金字塔最顶层寻找到的目标位置映射到下一层,在此层金字塔的一定领域内与模板进行更加精细的匹配。通过不断进行此操作直到图像金字塔最底层的位置,就可以得到最高分辨率的匹配精度。

3 着陆平台的跟踪

3.1 卡尔曼滤波预测模型

由于视觉着陆系统解算出来的飞行器的位置信息相对于当前时刻有一些滞后,为了提高飞行器着陆时的精度,需要对飞行器和着陆平台的相对位置进行预测。在本文中采取卡尔曼滤波预测模型算法对着陆平台下一帧的位置进行预测。

卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程,通过系统输入输出观测数据,对系统状态进行最优估计的算法。它可以通过对目标过去时刻的运动状态来对未来时刻目标的运动状态进行估计。本实验中可以将移动平台的运动状态模型看作一个卡尔曼滤

波器的模型,通过移动平台的历史运动数据预测它在下一帧的位置信息^[9]。本文中采用着陆平台标识中心点像素位置代替移动平台位置来进行预测。

定义着陆平台标识中心点像素的状态向量:

$$\mathbf{X} = [x \ y \ v_x \ v_y] \quad (11)$$

其中 (x, y) 和 (v_x, v_y) 分别表示着陆平台标识中心点像素位置和中心点像素的速度矢量。

定义着陆平台标识中心点像素的观测向量:

$$\mathbf{X} = [x \ y] \quad (12)$$

卡尔曼滤波系统的状态方程和观测方程为

$$\mathbf{X}_K^A = \mathbf{F}\mathbf{X}_{K-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{K-1} + \mathbf{W}_K \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_K = \mathbf{H}\mathbf{X}_K^A + \mathbf{V}_K \quad (14)$$

式(13)中的 $\mathbf{X}_k^A$ 为 k 时刻对系统状态的估计值, $\mathbf{X}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻系统状态的最优值, $\mathbf{F}$ 表示系统的状态转移矩阵, $\mathbf{U}_{k-1}$ 为系统的控制输入, 在本文中假定为 0。式(14)中的 $\mathbf{Z}_K$ 为 K 时刻的观测向量。式(13)和式(14)中的 $\mathbf{W}_K$ 和 $\mathbf{V}_K$ 是相互独立的白噪声序列, 取 $\mathbf{W}_K$ 和 $\mathbf{V}_K$ 的协方差矩阵分别是:

$$\mathbf{Q}_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sigma_{w_K}^2, \mathbf{R}_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \sigma_{v_K}^2 \quad (15)$$

在着陆平台标识跟踪过程中, 视频图像序列采集速度较快, 每相邻两帧图像的时间间隔短, 且目标位置变化很小。假定 Δt 为相邻两帧图像的时间间隔, 在单位时间内, 可将着陆平台的运动看作为匀速运动, 故定义系统的状态转移矩阵和测量矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{H} = 1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用式(13)到式(17)及状态的初始值, 结合实际的测量值 $\mathbf{Z}_K$, 在均值误差最小的情况下, 利用式(20)和式(21)对当前状态 $\mathbf{X}_K$ 修正, 可以计算出当前状态的最优估计值, 再由式(13)和式(18)对移

动平台下一时刻的状态进行预测, 然后对状态进行修订, 如此反复迭代, 直到目标跟踪停止。

$$\mathbf{P}_K^A = \mathbf{F}\mathbf{P}_{K-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_{K-1} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_K = \mathbf{P}_K^A \mathbf{H}_K^T (\mathbf{H}_K \mathbf{P}_K^A \mathbf{H}_K^T + \mathbf{R}_K)^{-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_K = \mathbf{X}_K^A + \mathbf{K}_K (\mathbf{Z}_K - \mathbf{H}_K \mathbf{X}_K^A) \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_K = (1 - \mathbf{K}_K \mathbf{H}_K) \mathbf{P}_K^A \quad (21)$$

3.2 偏移量求取

像素偏移量指的是图像中某个像素到图像中心点像素分别在 x 方向和 y 方向的偏移量。由于飞行器的控制参数要以世界坐标系为准, 所以需要将求出的像素偏移量通过转化来得到世界偏移量(本实验中摄像头垂直向下装在飞行器的正中心)。

本文像素偏移量的求取是通过计算图像中着陆平台标识中心点的坐标和图像中心点坐标的差值得到的, 再通过对摄像头标定得到计算需要的参数, 最后将像素偏移量由几何变换就可以得到世界偏移量^[10]。

$$X = H \frac{x}{f_x} + c_x \quad (22)$$

$$Y = H \frac{y}{f_y} + c_y \quad (23)$$

在式(22)和式(23)中的 X 、 Y 表示世界偏移量; x 、 y 表示像素偏移量; f_x 、 f_y 分别是在 x 方向和 y 方向的焦距; c_x 、 c_y 表示摄像头光心与图像中心点分别在 x 方向和 y 方向的偏移量, c_x 、 c_y 通过立体标定获得初始值, 再通过立体校准得到优化; H 表示摄像头光心到平台平面的高度, 高度是通过超声波获取的。

4 实验数据及结果分析

本文的实验环境基于 PC 机上的 Visual Studio 2010, 配置为 Opencv 库, 本文的算法是基于 Opencv 来编写的。

设置摄像头与着陆平台标识在 x 方向与 y 方向的偏移量为 180 mm 和 150 mm, 通过调整摄像头与着陆平台所在平面的相对高度, 用视觉着陆算法计算出 x 方向和 y 方向的偏移量, 如图 2 和图 3 所示, 实验结果如表 1 所示。

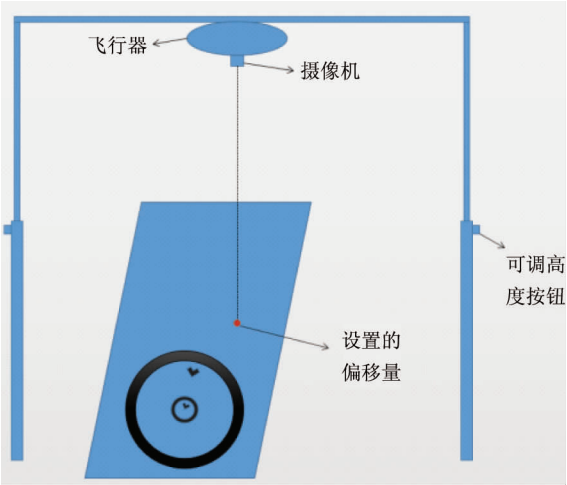


图 2 实验图

由表 1 可知,飞行器摄像头的高度在 500 mm 的范围以内时,在 x 方向和 y 方向的偏移量的误差在

表 1 设置的偏移量与计算的偏移量的对比分析

高度 (mm)	80	180	280	380	480
设置的偏移量 (mm)	$x = 180, y = 150$	$x = 180, y = 150$	$x = 180, y = 150$	$x = 180, y = 150$	$x = 180, y = 150$
计算的偏移量 (mm)	$x = 175, y = 156$	$x = 172, y = 159$	$x = 167, y = 162$	$x = 161, y = 169$	$x = 152, y = 177$
程序用时 (ms)	26.87	24.38	27.41	24.32	25.46

5 结 论

本文基于机载视觉研究了目标识别与状态估计方法。以图像边缘点亚像素坐标和梯度向量作为匹配信息,利用模板匹配中的相似度量函数进行模板与目标之间的匹配,以达到快速实时地识别着陆平台标识,以及计算出飞行器相对于着陆平台标识的位置信息,从而能够实时地为飞行器提供目标的准确位置信息。实验结果表明该算法识别的准确率高、处理速度快、可靠性强、跟踪效果好。本文的研究为进一步研究微型飞行器在移动平台上实现准确着陆奠定了基础。

参考文献

[1] 余冬勇,郝应光. UAV 视觉辅助自主降落技术研究 [D]. 大连:大连理工大学信息与通信工程学院, 2013. 1-3

[2] 李旭港. 计算机视觉及其应用与发展[J]. 科学技术,

30 mm 以内,当飞行器与着陆平台所在平面的相对高度越小时,在 x 方向和 y 方向的偏移量的误差越小。本文实验误差在微型飞行器着陆的精度范围内,并且程序的平均时耗在 25 ms 左右,能够满足本实验对于实时性的要求。

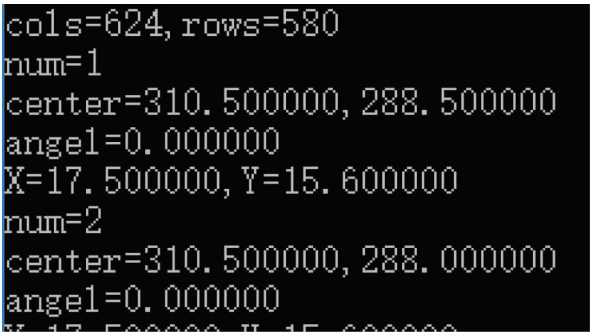


图 3 位置参数解算图

2010,42(4):460-465

[3] Tisdale J, Ryan A, Zennaro M, et al. The software architecture of the berkeley UAV platform[C]. In: 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, 2006. 1420-1425

[4] Silva J, Marques F, Rodrigues P, et al. Saliency-based cooperative landing of a multirotor aerial vehicle on an autonomous surface vehicle[C]. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bali, Indonesia, 2014. 1523-1530

[5] 刘士清,胡春华,朱纪洪. 基于计算机视觉的无人直升机位姿估计方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(4):564-568

[6] Sudevan V, Shukla A, Karki H. Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on a stationary target[C]. In: International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju, Korea, 2017, 362-368

[7] Steger C, Ulrich M, Wiedemann C. Machine Vision Algorithms and Applications[M]. 北京:清华大学出版社,2008. 340-345

[8] 王峰,王光华,刘文涛. 一种基于高阶曲面拟合的图像边缘检测方法[J]. 导弹与制导学报,2009,29(3): 276-278

[9] 胡正伟,刘创业. 基于卡尔曼滤波与哈希技术的模板匹配跟踪算法[J]. 计算机与现代化,2017,33(10): 57-61

[10] 罗哲,朱文球,张长隆. 基于视觉的四旋翼无人机着陆算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2015,11(25):122-124

**Airborne visual object identification and status estimation
method based on micro-flight vehicle**

Zhang Han, Yang Xianzhao, Chen Yang

(Institute of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

In order to obtain the relative position relation between the landing platform and the micro air vehicle (MAV) when it lands in real time, a method of target recognition and state estimation based on the airborne vision of the micro-aircraft is put forward. The gradient direction and sub-pixel coordinates of the image edge of landing platform are obtained by using curved surface fitting method, which are used as matching information for similarity calculation. After successful matching, the motion characteristics of the mobile platform are simulated through the motion equation, and the position of the mobile platform is predicted by using Kalman filter. Finally, the offset is calculated. The experiment data can be used to calculate the position parameters of the aircraft and landing platform through geometric transformation. Experiment results show that the proposed algorithm can calculate the relative position relation between the aircraft and the visual landing identification in real time.

Key words: target recognition, surface fitting, matching similarity, Kalman filter, the offset