

无人机视觉导航算法

黄楠楠, 刘贵喜, 张音哲, 姚李阳

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为保证无人机着陆精度和安全性, 提出了一种无人机自主着陆视觉导航位姿解算方法。首先对机载相机进行标定, 获取相机参数; 然后综合考虑地标形状和尺寸、地标角点几何分布和角点数量对位姿估计精度的影响, 设计了“T”型着陆地标形状和尺寸参数, 将地标轮廓提取和角点检测算法相结合, 得到几何分布好、数量适中的 8 个角点用于位姿解算, 保证了位姿解算精度; 为减少 LK (Lucas-Kanade) 光流法稳定跟踪地标的处理时间, 直接将提取的这 8 个角点作为 LK 光流法检测和跟踪的输入, 保证了算法实时性; 最后利用三维空间到二维像平面投影关系对飞行位姿参数进行实时解算。实验结果表明: 算法具有较高估计精度, 算法平均周期为 76.756 ms (约 13 帧/s), 在速度较低的着陆阶段基本满足自主着陆视觉导航的实时性要求。

关键词: 无人机; 光流法; 视觉导航; 坐标转换; 位姿解算

中图分类号: V249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0726005

Unmanned aerial vehicle vision navigation algorithm

Huang Nannan, Liu Guixi, Zhang Yinzhe, Yao Liyang

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to ensure accuracy and security of unmanned aerial vehicle (UAV) landing, a UAV autonomous landing with visual navigation pose parameters calculateion method was proposed. Firstly, the airborne camera was calibrated to get the camera parameters, then the important influence of landmark shape and size, angular point geometry distribution and number of points on pose estimation precision were considered, a "T" type landing landmark was designed with given size parameters, landmark contour extraction with corner detection algorithm was combined to get eight corners with good geometric distribution and the number was reasonable for pose estimation to guarantee the posture calculation accuracy. To reduce the processing time of Lucas-Kanade (LK) optical flow method tracking landmarks stably, the extracted eight corners were used as LK optical flow method input to detect and track, ensuring real-time performance of the algorithm. Finally, real-time flight pose parameters of UAV through the projection relationship between 3D space and 2D image plane were estimated. The results of

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-12-21

基金项目: 国防预研基金(Y42013010181, Y420150401XX); 国家部委十二五科技项目(Y31011040315);

中央高校基本科研业务费专项资金(NSIY191414)

作者简介: 黄楠楠(1988-), 女, 硕士生, 主要从事无人机视觉辅助导航、目标跟踪和图像处理等方面的研究。Email: 1607896949@qq.com

导师简介: 刘贵喜(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事目标跟踪, 计算机视觉, 组合导航等方面的研究。

Email: gxliu@xidian.edu.cn

simulation experiment show that the algorithm has high precision, and the average period is 76.756 ms (about 13 frames per second). The real-time requirements of visual aided navigation of autonomous landing at low speeds of landing stage is satisfied basically.

Key words: unmanned aerial vehicle; optical flow method; vision navigation; coordinate transformation; pose estimation

0 引言

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 自主着陆能力是实现自主飞行的重要能力。在现有的着陆导航方式中, 惯性导航 (Inertial Navigation System, INS) 由于需要通过积分运算来得到飞行器位置和速度信息, 使得误差会随着时间的推移不断累积; 全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 导航容易受到电子干扰, 导致导航出现较大误差, 甚至发生导航失效; INS/GPS 组合导航系统只能定位自身的位姿信息, 缺少飞机与着陆平台的相对位姿参数, 若在某些环境极其复杂的地点实施降落, 即便在提前知晓降落点经纬度的情况下, 也难以保证降落的精度和安全性。由此可知, 单独使用 INS/GPS 组合导航系统并不能提供无人机自主降落所需的导航信息^[1]。

针对以上导航方式存在的问题, 可以利用计算机视觉进行辅助导航。计算机视觉导航技术是利用视觉传感器获取图像, 通过图像处理和位姿解算得到无人机的实时位姿参数。视觉导航方法具有精度高、不受电子干扰等优点。特别在无人机自主导航与着陆过程中, 视觉导航具有其他导航方式所不具备的优势: (1) 当在移动平台 (如舰船) 上进行着陆时, 着陆平台会显著地移动或摆动, 视觉导航可以直接解算出飞机与平台的相对位姿参数, 相比于 INS/GPS 组合导航可以获得更多的导航信息; (2) 将视觉系统与惯性元件两个部分的测量结果进行数据融合, 可为 UAV 控制系统提供更高精度的导航参数; (3) 在复杂环境中飞行时, 利用视觉系统可以尽早发现周围环境中对飞行构成威胁的障碍物, 提高飞行安全系数。因此视觉导航技术受到越来越多的关注, 国内外许多研究机构和学者都在进行无人机视觉导航技术的研究。

美国加州大学伯克利分校的 BEAR 研究小组提

出用视觉测量无人直升机相对于着陆平台的相对位置和姿态^[2], 通过匹配区域信息判断着陆地标的出现, 然后对着陆地标顺序提取其 24 个角点, 基于投影关系进行无人机位姿估计。徐贵力等使用红外合作目标在全天候条件下引导无人机在舰艇甲板上着陆^[3], 红外合作目标是一个 T 型的平面图标, 对比了使用图像矩法和方向链码法对红外合作目标识别检测的效果, 但基于区域信息的方法要求无人机姿态接近水平, 因此适用范围不大。Laiacker M 等利用视觉算法检测和跟踪跑道实现无人机自主着陆^[4], 此算法可适应不同的天气状况和跑道轻微遮挡情况, 但不适用于无跑道的着陆地点, 应用范围有限。Kong W 等用安装在地面上的红外立体视觉系统通过检测和跟踪红外目标实现无人机自主着陆^[5], 但当背景中有很多温度较高的物体时, 算法不能很准确地捕捉到目标的中心, 精度不高。Yang G 等提出了一种用红外灯光基于视觉导航的无人机精确着陆的方法^[6], 此方法在背景复杂的情况下也能很好的识别红外灯目标, 抗干扰性好, 但系统结构复杂, 实施起来困难。悉尼大学 Tsai A C 等研究的无人机自主着陆系统^[7], 设计了一个 T 型的着陆地标, 通过提取着陆地标的平行线来得到 4 个交点, 来估计无人机的位姿状态, 但运用线特征比点特征计算复杂, 实时性不好。德国的 Konstantin S 等提出了一种通过 4 台相机进行双目视觉导航方法^[8], 采用双目立体视觉方法可以处理大部分场景, 但重建后获得的深度信息可能有因深度丢失导致位姿信息计算不完整或错误的情况, 同时基于双目视觉的三维重建计算量大, 实时性不好。

基于以上研究基础, 文中提出了一种单目视觉导航算法, 精心设计着陆地标的形状及尺寸参数, 将轮廓提取和角点检测算法相结合, 获得几何分布特性好、数量适中的 8 个角点; 算法无需深度信息, 仅利用这 8 个角点就可精确解算无人机和着陆平台的

相对位姿参数。为了保证算法的实时性，对 Lucas-Kanade(LK)光流法稳定跟踪地标的处理过程做了重要改进，直接将提取的这 8 个角点作为 LK 光流法检测和跟踪的输入，大大减小了 LK 光流法角点检测与角点跟踪的数量。

1 视觉导航算法流程

文中的视觉导航算法主要包括摄像机标定、地标选择、图像处理、位姿解算 4 个部分，算法总体结构框图如图 1 所示。

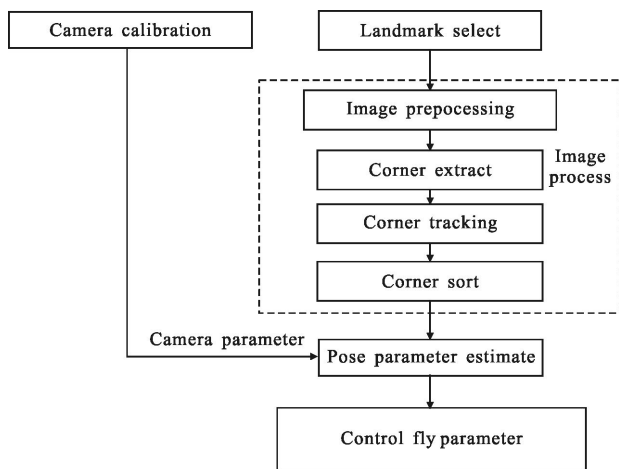


图 1 算法总体结构框图

Fig.1 Overall structure diagram of algorithm

1.1 摄像机标定

摄像机标定是联系真实三维世界测量和摄像机测量的桥梁。相机标定是计算机视觉领域最基本也是最重要的问题之一，它是通过摄像机获取的二维图像得到三维空间信息的关键步骤^[9-11]。相机标定本质上是求解摄像机几何模型参数的过程，从而依照模型建立二维图像特征点和三维空间点的关系，为实现三维重构、图像测量等奠定基础。通过对机载相机进行标定，获得相机的内参数矩阵和畸变参数矩阵，为位姿解算提供必要的信息。

标定方法采用基于平面标定模板的张正友方法，该方法依靠多幅标定模板图像对应点之间的坐标关系直接进行相机参数解算^[9]。黑白棋盘是目前使用最多的标定模板^[10]，故采用由相机在不同视角下拍摄到的 16 张棋盘方格图像对无人机载相机进行标定，Opencv 算法库的^[11]标定过程如图 2 所示。

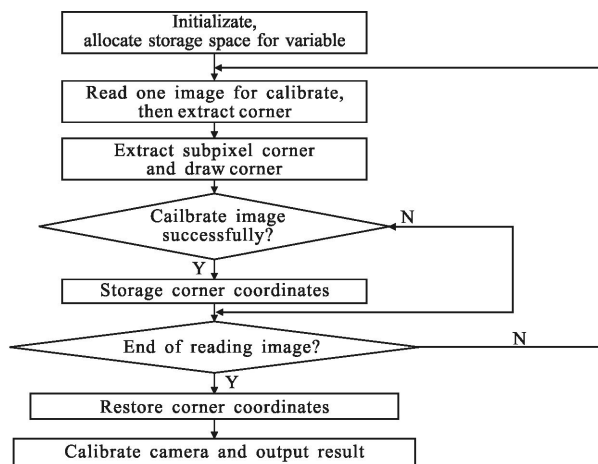


图 2 相机标定过程

Fig.2 Process of camera calibration

通过标定可求得摄像机的内参数矩阵 M 和畸变矩阵 P ：

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3] \quad (2)$$

式中： f_x 和 f_y 为 x 和 y 方向上的焦距； c_x 和 c_y 为考虑到摄像机芯片的中心通常不在光轴上而引入的参数； k_1 、 k_2 、 k_3 为径向畸变参数； p_1 、 p_2 为切向畸变参数。

1.2 地标设计

视觉导航中常用的地标有 6 个正方形组成的地标^[2]，T 型地标^[7]，H 型地标，2 个菱形与 1 个圆形的组合地标等。文中设计 T 型地标作为着陆地标原因如下：(1) 文中用到的特征是点特征，为保证无人机位姿计算的正确性，提取到的特征点的个数固定且必须按特定的顺序排列，通过对比文献中各地标的特点，得出 T 型地标比较符合要求，且 T 型地标容易确定正确的排列顺序（圆形地标和 H 型地标正着排序和倒着排序结果一样，无法判断排序结果的正确与否）；(2) 由矩形组成的“T”型地标棱角分明，容易提取特征点。

通过着陆实验得出地标尺寸对着陆精度的影响如下：(1) 若地标尺寸过大，无人机在距离地标较近时只能看到地标的一小部分，特征点提取不全导致位姿解算错误；(2) 若地标尺寸过小，无人机在距离地标较远时会看不清地标，也会因特征点提取错误导致位姿解算错误。故为了保证无人机开始着陆时

能清楚地看到地标,且在着陆末端也能尽量看到地标的全部,即地标不能过大也不能过小,文中设计的“T”型地标由两个长 3 m、宽 1 m 的矩形组成。

文中提取的 8 个角点的分布和排序情况如图 4 所示,其中左上角角点 a 定为地标坐标系原点,坐标为(0,0),以向左为 x 轴正方向、向下为 y 轴正方向,其余各点顺时针排序,其坐标依次为(3,0)、(3,1)、(2,1)、(2,4)、(1,4)、(1,1)、(0,1)。位姿解算过程中角点的像素坐标必须和世界坐标一一对应,图 4 所示的角点分布有规律,可以保证角点像素坐标和世界坐标一一对应,从而保证位姿解算的准确性。文中对提取不同角点个数的时间进行了对比试验,实验结果可知:角点个数越多,所用时间越长。在保证解算精度的前提下考虑实时性问题,故用 8 个角点进行解算。

1.3 地标检测和角点提取

地标检测目的是从机载相机获取的着陆平台图像中分割出地标。地标检测与分割主要步骤如下:(1) 首先将着陆平台图像转换为灰度图像;(2) 对灰度图像进行二值化处理,需要根据地标和背景的区别选择合适的二值化阈值,文中采用的着陆地标为黑色,相对于背景灰度值接近 0,因此,应选择较小的阈值;(3) 对二值图像进行形态学处理,主要包括形态学开运算和形态学闭运算,开运算连通相互间隔的区域,闭运算消除孤立的噪声点;(4) 对形态学处理过的二值图像采用 Laplace 算子提取轮廓;(5) 对提取到的轮廓进行多边形拟合,得到完整清晰的地标图像。图像预处理的过程如图 3 所示。

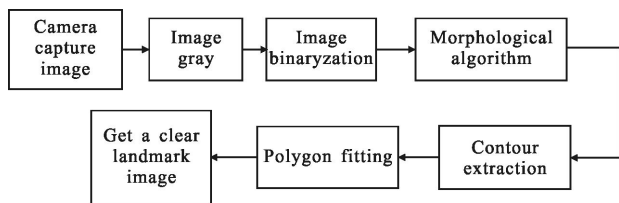
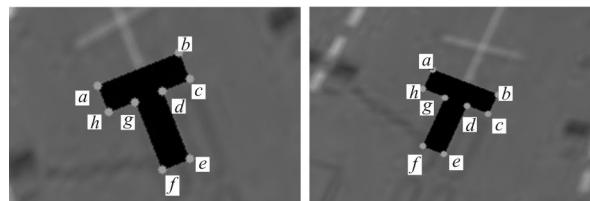


图 3 图像预处理

Fig.3 Image preprocess

对分割出的地标图像进行角点提取,常用的角点提取方法主要有 FAST、SIFT、SURF、Harris、Shi-Tomasi 等。文中采用机载相机获取的实际着陆平台图像(如图 4 所示),对上述各种角点提取的时间进行了对比实验,结果如表 1 所示。从对比结果可知

FAST 角点的时间最短,Harris 角点的提取时间次之,但相比于 FAST 角点,Harris 角点具有较好的鲁棒性,故选用 Harris 角点来提取地标的角点。



(a) 初始点 X 坐标最小 (b) 初始点 Y 坐标最小
 (a) Initial point X coordinate is minimal (b) Initial point Y coordinate is minimal

图 4 角点排序结果图

Fig.4 Angular point sorted result

表 1 角点平均提取时间对比

Tab.1 Average corner extraction time

Corner name	Image size /pixel	Extracting time /ms	Extracting number
FAST	360×240	1.398 04	7
SIFT	360×240	261.903	8
SURF	360×240	60.930 1	8
Harris	360×240	33.643	8
Shi Tomasi	360×240	49.189 2	8

因为角点的几何分布和角点数量对位姿解算的准确与否至关重要,为了保证角点几何分布特征,将地标轮廓检测和角点提取算法相结合最终得到几何分布好、数量适中的 8 个角点,如图 4 所示。

无人机在动态着陆过程中为防止地标丢失,采用 LK(Lucas-Kanade)光流法进行角点检测和跟踪,但是 LK 光流法检测和跟踪角点时会对摄像机观察到的图像进行遍历检测、角点匹配和跟踪,这样处理过程十分耗时;论文对 LK 光流法检测跟踪过程做了重要改进:(1) 直接将前面阶段获取的 8 个角点作为 LK 光流法的输入,避免 LK 光流法对整幅图像进行遍历检测角点;(2) 使 LK 光流法仅对这 8 个角点进行匹配和跟踪,大大减少了角点检测、匹配和跟踪的数量,从而提高实时性。对跟踪成功的 8 个角点进行排序,角点排序的目的是使角点像素坐标和角点物理坐标一一对应,排序步骤:(1) 将提取的 8 个角点保存到容器中;(2) 遍历所有角点,取出 y 像素坐标最小的点做为候选起始点 a ,然后其余各点顺时

针排列依次设为 b, c, d, e, f, g ; (3) 比较 a, b 两点之间距离与 a, h 两点之间距离, 若 a, b 两点之间距离大于 a, h 两点之间距离, 则为正确排序, 所选 a 点即为正确起始点, 然后其余角点顺时针依次为 b, c, d, e, f, g , 若 a, b 两点之间距离小于 a, h 两点之间距离, 则所选 a 不是正确的起始点, 执行第(4)步重新进行排序; (4) 遍历所有角点, 取出 x 像素坐标最小的点即为始点 a , 然后其余角点顺时针依次为 b, c, d, e, f, g 。

1.4 位姿解算

首先建立相关坐标系。由于无人机的机动性, 机载相机可能位于在环境中的任何位置, 故要在环境中建立一个基准坐标系来描述摄像机的位置, 并用它描述环境中任何物体的位置, 该基准坐标系称为世界坐标系, 由 x_w, y_w, z_w 轴组成。设 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ 是空间某一点 p 的世界坐标, $p_c(x_c, y_c, z_c)$ 是该点在摄像机坐标系中的坐标, $p(x, y)$ 是该点在图像平面坐标系中的物理坐标, $p(u, v)$ 是图像平面坐标系中的像素坐标。

将三维空间点 p 在世界坐标系中的坐标值 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ 变换为图像平面上像素坐标系中坐标值 $p(u, v)$ 的过程可分解为下述的 4 步变换。

(1) 世界坐标系中坐标 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ 转换为摄像机的坐标系中的坐标 $p_c(x_c, y_c, z_c)$ 。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + T \quad (3)$$

其中:

$$R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T = (t_x \ t_y \ t_z)^T \quad (5)$$

式中: R 为一个 3×3 旋转矩阵; T 为一个 3×1 平移向量。

(2) 摄像机坐标系中坐标 $p_c(x_c, y_c, z_c)$ 在针孔模型中进行规范化投影, 得到图像平面坐标系中物理坐标 $p(x, y)$ 。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{t_c}{z_c} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(3) 引入透镜的径向畸变和切向畸变, 图像平面坐标系中物理坐标 $p(x, y)$ 扩展 $p(x_q, y_q)$ 。

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \times \begin{pmatrix} \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{t_c}{z_c} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: k_1 和 k_2 为径向畸变系数; p_1 和 p_2 为切向畸变系数, $r^2 = x^2 + y^2$ 。

(4) 图像平面坐标系中物理坐标 $p(x_q, y_q)$ 转换为像素坐标 $p(u, v)$:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x x_q + u_0 \\ f_y y_q + v_0 \end{pmatrix} \begin{cases} f_x = \frac{f \times s}{\Delta x} \\ f_y = \frac{f \times s}{\Delta y} \end{cases} \quad (8)$$

式中: (u_0, v_0) 为基准点 (通常在图像的中心); f 为摄像机的有效焦距; s 为比例因子, 用来适应在计算机图像水平方向上取样带来的种种不确定因素; Δx 为计算机图像在水平方向 (x 方向) 上相邻两像素之间的有效距离 (mm/pixel); Δy 为计算机图像在垂直方向 (y 方向) 上相邻两像素之间的有效距离 (mm/pixel)。

综合上述公式得到如下等价表达式:

$$s \times P_0 = M(R|T) \times P_1 \quad (9)$$

式中: $P_0(u, v, 1)^T$ 为图像像素点的齐次坐标; $P_1(x, y, z, 1)^T$ 为空间点的齐次坐标; M 为摄像机的内参矩阵; $(R|T)$ 为外参矩阵, 这样就得到了一个图像点和空间点之间的一个映射关系。

无人机的位姿参数是指无人机的滚转角、偏航角和俯仰角和无人机相对于着陆平台的位置, 其中各个姿态角参数定义如下。

俯仰角 φ : 无人机机体坐标轴 $o_w z_w$ 与世界坐标系水平面 $x_w o_w y_w$ 之间的角, 以无人机抬头为正。相当于摄像机坐标系绕 x_w 旋转后获得的角度。偏航角 α : 无人机机体坐标轴 $o_w z_w$ 在世界坐标系水平面 $x_w o_w y_w$ 上的投影与 $o_w y_w$ 轴之间的夹角, 以无人机偏向 $o_w y_w$ 轴右侧 ($o_w x_w$ 正向) 为正。即相当于摄像机坐标系绕 y_w 旋转后获得的角度。滚转角 Ω : 无人机机体坐标轴 $o_w y_w$ 与世界坐标轴 $o_w z_w$ 之间的夹角, 以无人机右倾 ($o_w x_w$ 正向) 为正; 也可定义机体 x_w 轴在 $x_w o_w z_w$ 平面上的投影和地平线的夹角, 以无人机右倾为正。即相当于摄像机坐标系绕 z_w 旋转后获得的角度。

世界坐标系通过平移和旋转后获得摄像机坐标系, 平移对应的是距离的变化, 即摄像机相对于世界坐标系的距离 (包括 x, y, z 轴), 旋转对应的是角度的变化, 即摄像机平移后通过旋转相对于世界坐标系

的角度(包括滚转、俯仰、偏航),坐标旋转关系如图 5 所示。可以通过位姿解算法获得 R 矩阵和 T 矩阵,建立旋转矩阵和角度之间的关系是对无人机姿态角进行解算的关键。

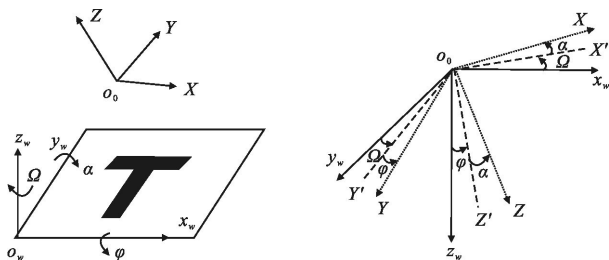


图 5 坐标旋转图

Fig.5 Coordinate rotation figure

$$R = \begin{pmatrix} \cos\Omega\cos\alpha & \sin\Omega\cos\alpha & -\sin\alpha \\ \cos\Omega\sin\alpha - \sin\Omega\cos\phi & \cos\Omega\cos\phi + \sin\Omega\sin\alpha\sin\phi & \cos\alpha\sin\phi \\ \sin\Omega\sin\alpha + \cos\Omega\sin\alpha\cos\phi & \sin\Omega\sin\alpha\cos\phi - \cos\Omega\sin\phi & \cos\alpha\cos\phi \end{pmatrix} \quad (13)$$

公式(4)和(13)两式联立可得角度表达式:

$$\begin{cases} \alpha = -\arcsin(r_3) \\ \Omega = \arcsin\left(\frac{r_2}{\cos\alpha}\right) \\ \phi = \arcsin\left(\frac{r_6}{\cos\alpha}\right) \end{cases} \quad (14)$$

由前面的摄像机坐标系和世界坐标系的关系公式(1)可得公式(15):

$$\begin{cases} x_c = r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + t_x \\ y_c = r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + t_y \\ z_c = r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + t_z \end{cases} \quad (15)$$

由 RAC 径向一致性可得公式(16):

$$\frac{x_c}{y_c} = \frac{x_d}{y_d} = \frac{r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + t_x}{r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + t_y} \quad (16)$$

公式(16)可以用矢量的形式表示为下式:

$$XY^T = x_d \quad (17)$$

式中: $X = [x_w y_w z_w y_d -x_w y_d -y_w y_d -z_w y_d]$; $Y = \left[\begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 & t_x & p_4 & p_5 & p_6 \\ t_y & t_y & t_y & t_y & t_y & t_y & t_y \end{matrix} \right]$ 为待求参数; (x_d, y_d) 为角点像素坐标; (x_w, y_w) 为角点世界坐标。当存在大于或等于 7 个已知点时,方程具有唯一解或最小二乘解;因此把摄像机内参矩阵 M 、8 个地标角点物理坐标 (x_d, y_d) 和世界坐标 (x_w, y_w) , 一并带入公式(17)从而得到 Y 中的未知参数,从而得到旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,进而求出 3 个姿态角。已知着陆地标的原

图 5 按照 zyx 顺序旋转,先进行 z 轴旋转得到的坐标系的关系式为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega & 0 \\ -\sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} \quad (10)$$

最后进行 y 轴旋转得到坐标系的关系式为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \sin\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_w \end{pmatrix} \quad (11)$$

然后进行 x 轴旋转得到的坐标系的关系式为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y \\ z' \end{pmatrix} \quad (12)$$

通过 zyx 的旋转顺序可以获得 R 矩阵,为:

点在世界坐标系中的坐标为 (x, y, z) 和姿态估计所求得的平移向量 (t_x, t_y, t_z) ,由坐标系转换关系可求得无人机相对于着陆平台的位置为 $(x-t_x, y-t_y, z-t_z)$ 。

通过投影矩阵求解无人机的位姿数据是现在应用最普遍的算法,也是计算精度较高的算法,如参考文献[12-13]。通过相机标定得到其内参矩阵和畸变矩阵,校正相机畸变带来的误差,从而可减少相机畸变带来的误差;通过三维空间到二维像平面投影关系计算位姿数据,算法模型稳定,实时性好。

文中创新的重点在“地标选择和图像处理”部分,这就为位姿解算部分的实时性和精确性提供了前提。通过投影矩阵求解无人机的位姿,相当于通过点与点的空间坐标关系求解,算法稳定、可靠、耗时少、实时性好;并且这样可减小相机的畸变带来的误差,仅仅只有提取目标点时所带来的误差,从而减少了误差来源,保证了算法的精确性;具有重要的工程应用价值。

2 实验结果

2.1 实验方法

实验在 AMD A10-6700 APU with Radeon(tm) HD Graphics 3.70 GHz 处理器、4.00 GB 内存的 PC 机上进行。先为无人直升机设定一组真实飞行位姿数据,无人机按真实飞行位姿数据飞行过程中拍下

视频作为导航算法所用视频,视觉算法和视景仿真相结合。仿真用单屏显示,其中左上角是摄像机视图,左中部分是无人机飞行主视图,右侧显示着陆画面、着陆姿态数据及电子地图,其中飞行参数与估计参数显示部分是显示无人机飞行位姿参数的真实值和估计值其布局如图 6 所示。

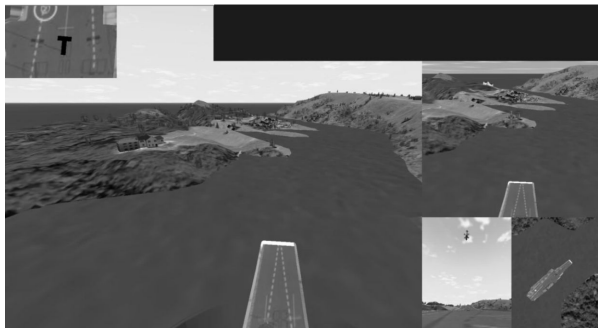
Camera view	Unmanned aerial vehicle (UAV) flight main view	Flight parameters and estimate parameters display	
		After tracking view	
		Carrier observation view	Electronic map view

图 6 仿真实验显示布局

Fig.6 Layout of simulation experiment displays

下面一组图是视景仿真场景图,在着陆过程中随机截取了 3 组图(图 7),距离着陆地标的距离分别为 89.6 m、46.9 m、31.2 m。

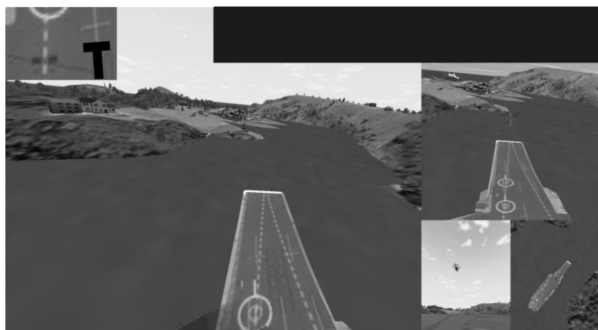
Landing Unit:	xPosition m	yPosition m	zPosition m	Heading degree	Heading degree	Heading degree
True:	3 364.8	-4 790.4	105.9	4.9	0.0	0.0
Estimate:	3 365.1	-4 790.7	103.8	5.5	-0.5	-0.7



(a) 着陆阶段一

(a) Landing stage one

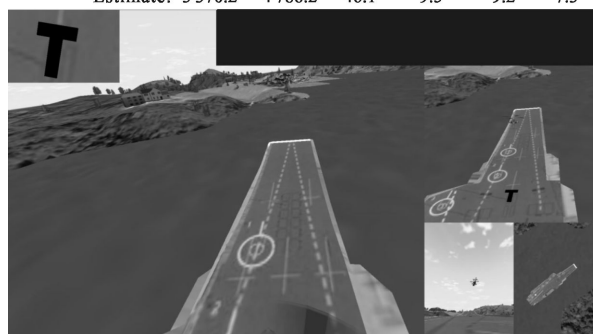
Landing Unit:	xPosition m	yPosition m	zPosition m	Heading degree	Heading degree	Heading degree
True:	3 354.4	-4 787.7	61.0	-4.5	0.6	-5.3
Estimate:	3 355.5	-4 787.8	58.8	-3.8	0.9	-5.0



(b) 着陆阶段二

(b) Landing stage two

Landing Unit:	xPosition m	yPosition m	zPosition m	Heading degree	Heading degree	Heading degree
True:	3 370.6	-4 785.6	46.5	9.7	-8.9	7.3
Estimate:	3 370.2	-4 786.2	46.1	9.5	-9.2	7.3



(c) 着陆阶段三

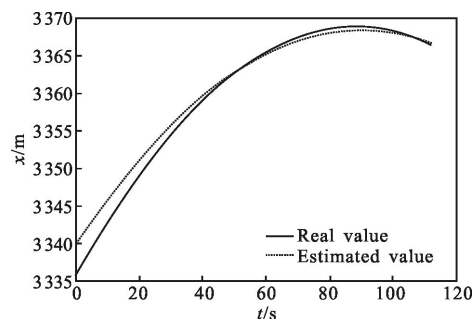
(c) Landing stage three

图 7 视景仿真场景

Fig.7 Visual simulation scene

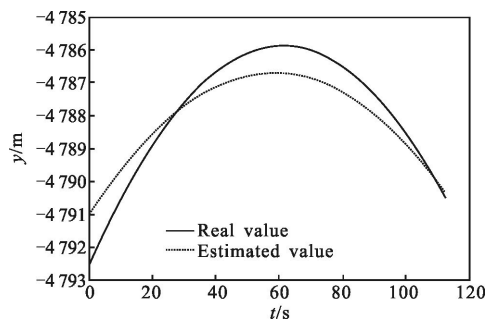
2.2 实验结果

文中算法实验结果如图 8 和图 9 所示。位置估计值和真实值对比曲线如图 8 所示,姿态角估计值和真实值对比曲线如图 9 所示。其中实线代表真实值,点划线代表估计值。



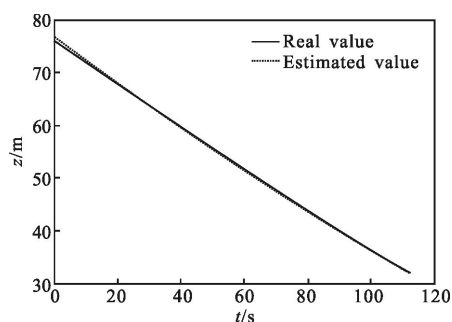
(a) X 方向真实值和估计值曲线

(a) Curves of real and estimated values of X direction



(b) Y 方向真实值和估计值曲线

(b) Curves of real and estimated values of Y direction

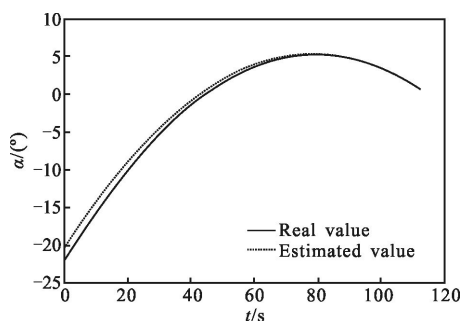


(c) Z 方向真实值和估计值曲线

(c) Curves of real and estimated values of Z direction

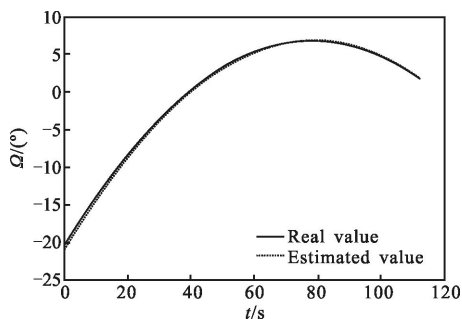
图 8 位置真实值和估计值曲线

Fig.8 Position curve of real and estimated values



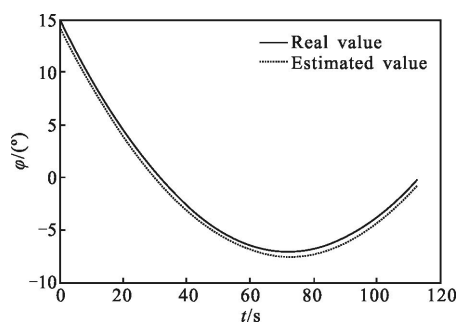
(a) 偏航角真实值和估计值曲线

(a) Curves of real and estimated values of yaw angle



(b) 滚转角真实值和估计值曲线

(b) Curves of real and estimated values of roll angle



(c) 俯仰角真实值和估计值曲线

(c) Curves of real and estimated values of pitching angle

图 9 姿态角估计值和真实值曲线

Fig.9 Attitude curve of real and estimated values

表 2 给出了算法的平均周期, 一个周期由图像处理时间、角点提取时间和跟踪角点时间组成。可以看出: 平均周期为 76.756 ms(约 13 帧/s), 在速度较低的着陆阶段基本满足无人机自主着陆视觉导航的实时性要求。

表 2 算法的平均周期时间

Tab.2 Average period time of algorithm

	Image process	Corner extract	Corner track	Pose estimate	Cycle
Time/ms	0.392	33.643	42.309	0.412	76.756

2.3 算法适用性

该算法针对的是旋翼无人机, 旋翼无人机在着陆阶段速度可以控制得很低。无人直升机的着陆速度一般为 2 m/s 左右^[14], 故文中针对无人机的速度在 2 m/s 时进行了实验, 由实验结果可知: 当无人机距离着陆地标的高度为 93 m 以内, 距离在 100 m 以内(即无人直升机接近在地标正上方时), 着陆速度在 2 m/s 左右时, 算法的解算精度和实时性满足要求; 且着陆速度越低, 算法的精度越高。

当无人机着陆速度在 2 m/s 或更低时, 相机捕获的地标图像比较清晰、完整, 此时可保证 8 个角点的正确匹配; 若在大机动条件下, 即无人机速度过快、抖动比较大; 或海面上有大雾, 地标能见度低时, 此时需要增加角点的提取个数, 即改进算法以保证精确度。

无人机距离地标的距离过远, 高度过高, 相机捕获的地标图像太小, 无法正确提取到固定的 8 个角点, 从而导致位姿解算失败; 无人机距离地标越近, 高度越低, 相机捕获到的地标图像越清晰、完整, 角点提取和匹配耗时越少, 算法精度和实时性就越好。若无人机着陆时速度过快, 容易错过地标从而导致视觉算法无法运行, 此时可通过无人机在着陆地标上空盘旋几圈让速度降低到 2 m/s 左右时再进行着陆; 无人机着陆速度越慢, 相机获得的图像就越平稳, 角点匹配正确率越高, 精度就越高。

3 结论

文中提出了一种无人机自主着陆视觉辅助导航的位姿解算方法, 用于实时估计无人机的飞行位姿

参数,保证降落的精度和安全性。首先自行设计了一个 T 型地标参数,然后对机载相机拍摄的着陆平台视频进行地标检测和分割,轮廓检测、角点提取、角点跟踪和角点排序处理;最后用根据投影关系和各坐标系间的转换关系解算出无人机相对于着陆平台的位姿数据。仿真实验中将视觉导航算法和视景仿真实验融为一体,验证了算法的真实性、准确性和可行性,实验结果表明:文中算法具有较高估计精度,算法平均周期为 76.756ms(约 13 帧/s),无人机在视觉辅助着陆阶段飞行速度相对较低,因此基本可以满足无人机自主着陆视觉辅助导航的实时性要求。算法稳定、可靠、性能良好,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Wu Xianliang, Shi Zongying, Zhong Yisheng. An overview of vision-based UAV navigation [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(S1): 62-65. (in Chinese)
吴显亮, 石宗英, 钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(S1): 62-65.
- [2] Sharp C S, Shakernia O, Shankar Sastry S. A vision system for landing an Unmanned Aerial Vehicle [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2001, 2: 1720-1727.
- [3] Xu G L, Zhang Y, Ji S Y, et al. Research on computer vision-based for UAV autonomous landing on a ship [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(6): 600-605.
- [4] Laiacker M, Kondak K, Schwarzbach M, et al. Vision aided automatic landing system for fixed wing UAV[C]//Intelligent Robots and Systems(IROS), RSJ International Conference on, 2013: 2971-2976.
- [5] Kong W, Zhang D, Wang X, et al. Autonomous landing of an UAV with a ground-based actuated infrared stereovision system[C]//Intelligent Robots and Systems(IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on: 2963-2970.
- [6] Gui Y, Guo P Y, Zhang H L, et al. Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 72(2): 197-218.
- [7] Tsai A C, Gibbens P W, Stone R H. *Advances in Image and Video Technology* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006: 672-681.
- [8] Schauwecker K, Zell A. On-Board Dual-Stereo-Vision for the Navigation of an Autonomous MAV [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74(1-2): 1-16.
- [9] Zhang Dan, Duan Jin, Gu Lingjia, et al. Method of camera calibration based on image processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 293-297. (in Chinese)
张丹, 段锦, 顾玲嘉, 等. 基于图像的模拟相机标定方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 293-297.
- [10] Niu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133-137. (in Chinese)
牛海涛, 赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 133-137.
- [11] Li Zhihua, Li Xinguo. Infrared small moving target detection and tracking based on OpenCV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2561-2565. (in Chinese)
黎志华, 李新国. 基于 OpenCV 的红外弱小运动目标检测与跟踪[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2561-2565.
- [12] Xu Yong, Jia Tao. Position and attitude measurement method based on unmanned aerial vehicle image feature fusion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 160-170. (in Chinese)
许勇, 贾涛. 基于图像特征融合的无人机位姿测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 160-170.
- [13] Wu Jiahuan, Ma Jinsheng. Key technology of vision-based navigation for aircraft based on GPU-SIFT [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(4): 1371-1374. (in Chinese)
吴佳欢, 马金盛. 基于 GPU-SIFT 算法的飞行器视觉导航姿态估计关键技术 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1371-1374.
- [14] Huang Hai. Research on flight control technology of the unmanned helicopter during hover/low-speed flight [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
黄海. 无人直升机悬停/小速度段的飞行控制律设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.