

基于视觉标志检测的旋翼无人机姿态估计方法

齐咏生¹ 孟学斌¹ 高学金² 张丽杰¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特 010080; 2. 北京工业大学信息学部, 北京 100124)

摘要: 为了使旋翼无人机快速、精确、自主降落到地面着陆平台, 提出一种基于视觉标志检测的无人机姿态估计方法。首先, 利用标准直升机停机坪的几何特征, 采用标志五步提取算法从机载摄像头采集的图像中获取视觉标志; 为了满足无人机自主着陆过程的快速性和实时性, 提出一种基于距离三点法的角点检测算法, 得到 H 形标志的 12 个角点; 然后, 通过对角点分类、编号, 并与参考图像中的对应角点进行匹配, 解算出包含相对姿态信息的单应矩阵; 最后, 应用直接线性变换(Direct linear transformation, DLT)分解单应矩阵得到无人机的姿态角, 并依据相机成像的相似三角形原理计算出无人机相对于视觉标志的位置, 解决了单目相机尺度不确定性问题。通过实验平台模拟无人机不同飞行状态下的姿态并进行估计, 对提出算法的实时性和准确性进行了实验验证。实验结果表明: 本文算法的平均执行时间为 307.2 ms, 位置估计的最大均方根误差为 0.006 2 m, 姿态角估计的最大均方根误差为 0.313°, 满足无人机自主着陆的准确性和实时性要求。

关键词: 旋翼无人机; 自主着陆; 标志检测; 机器视觉; 姿态估计

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0028-13

Pose Estimation Method of Rotor UAV Based on Visual Mark Detection

QI Yongsheng¹ MENG Xuebin¹ GAO Xuejin² ZHANG Lijie¹

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010080, China
2. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to make the rotor UAV land on the ground platform quickly and accurately, a pose estimation method based on visual mark detection was proposed. Firstly, based on the geometric features of the standard helipad, a five-step landmark extraction algorithm was used to obtain the visual landmarks from the images captured by the airborne camera. In order to satisfy the rapid and real-time requirements of UAV autonomous landing process, a distance-based three-point corner detection algorithm was proposed, and 12 H-shaped corners were obtained. Then, by classifying and numbering the corners, the corners of the visual mark in the current image were matched with the corresponding corners in the reference image, and the homography matrix containing the pose information was calculated. Finally, the attitude angle of UAV was obtained by decomposing homography matrix with direct linear transformation (DLT), and the position of UAV relative to visual mark was calculated according to the similar triangle formed by camera imaging. The real-time performance and accuracy of the proposed methodology were proved by simulating the pose of UAV in different flight states on an experiment platform. The outcomes showed that the average running time of the given algorithm was 307.2 ms, the maximum root mean square error (RMSE) of position estimation was 0.006 2 m, and the maximum RMSE of attitude angle estimation was 0.313°, which can satisfy the requirements of accuracy and real-time in the autonomous landing process.

Key words: rotor UAV; autonomous landing; mark detection; machine vision; pose estimation

0 引言

四旋翼无人机涉及到导航、计算机视觉、控制理

论、嵌入式电子等多方面的技术, 具有体积小、成本低、机动性好、可垂直起降等特点^[1], 不仅被应用于医疗救援、环境监控、灾情监测、远程遥感等领域, 而

收稿日期: 2018-11-02 修回日期: 2018-12-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(61763037、61663034)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS0601)
作者简介: 齐咏生(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事计算机视觉和故障诊断研究, E-mail: qys@imut.edu.cn

且也越来越多地应用于农业感知和电力检修等特殊领域^[2-3]。这些应用中,无人机自主着陆是重要技术之一,要实现无人机的自主着陆,就要实现对无人机姿态的精确估计。

随着计算机视觉技术的发展,利用机载摄像头捕获的图像信息估计无人机的姿态受到国内外学者的广泛关注。LEE 等^[4]提出了一种识别国际标准直升机停机坪的视觉算法,通过外部圆环和内部 H 形标志的边缘分布函数,可实现着陆标志的识别,但并未进行无人机的姿态估计。OLIVEIRA 等^[5]提出两种依靠机器学习的方法来自动检测由传统的圆环和 H、X 形字符组成的两类着陆标志。PRAKASH 等^[6]采用加速鲁棒特征(Speeded up robust features, SURF)算法提取 H 形着陆标志的特征,并根据这些特征,将预装载的着陆标志模板和无人机拍摄的图像进行匹配,该方法同样只进行了标志检测与匹配。SARIPALLI 等^[7-9]提出了一种基于几何特征的形状识别方法来检测 H 形视觉标志,并实现了无人机姿态的估计。该方法只给出了无人机相对于标志的 x 、 y 坐标和方向,并未得到 6 自由度的姿态。SANCHEZ-LOPEZ 等^[10-11]也提出了类似的方法,将主成分分析法(Principal component analysis, PCA)应用于图像中每一个连通域的前 7 个 Hu 不变矩,并将 PCA 处理获得的信息作为人工神经网络的输入,利用得到的 H 形标志角点计算无人机的姿态,然而神经网络的应用增加了算法的复杂度和计算量,不利于嵌入式系统移植。SILVA 等^[12]提出了一种全局搜索方法,能够在视野中找出可能包含着陆标志的最佳地点,无人机对每一个观测点进行基于视觉的局部标志搜索。LIN 等^[13]提出基于单目视觉的实时目标识别与跟踪方法,对直升机停机坪的轮廓进行特征点匹配和聚类,能够在杂乱的环境中识别出着陆标志,并得到 4 自由度的姿态信息。PREMACHANDRA 等^[14]提出了另一种检测无人机着陆标志的方法,通过树莓派处理由摄像头捕获的图像数据和由超声波传感器获得的无人机飞行高度数据,并利用 Hough 变换识别 H 形标志。SUDEVAN 等^[15]采用 SURF 算法提取 H 形标志的特征点,并采用基于快速近似最邻近(Fast library for approximate nearest neighbors, FLANN)的描述符匹配方法将捕获的图像与模板图像进行匹配,从而计算出无人机与 H 形标志中心的位置偏差。

基于视觉的无人机姿态估计仍然是当前的研究热点问题,文献[10-11]虽可以较精确地估计出无人机的 6 自由度姿态数据,但算法中应用了计算量较大的多层感知器(Multi-layer perceptron, MLP),

对控制器的实时处理能力要求较高;文献[12,14]需要 GPS、惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)、超声波等辅助传感器,增大了算法的复杂性和成本。

为此,本文提出一种仅由单目视觉实现无人机姿态估计的方法,旨在保证准确性的前提下满足无人机控制器的快速性和实时性要求。充分利用图像几何特征易于快速提取的优势,采用五步标志提取方法获取视觉标志,提出一种基于距离三点法的角点检测算法得到视觉标志的角点,实现视觉标志的快速提取。并对算法的有效性和时间性能进行验证。

1 算法框架

本文提出的基于视觉标志检测的旋翼无人机姿态估计算法的总体框图如图 1 所示。首先对由机载摄像头捕获到的包含视觉标志在内的图像进行预处理,消除图像噪声并突出视觉标志;然后根据视觉标志的几何特征,通过五步法提取出 H 形标志和圆环组成的视觉标志;采用距离三点法检测 H 形标志的 12 个角点并与预设参考图像中的对应角点进行匹配;最后,根据匹配的角点对计算单应矩阵,采用直接线性变换(DLT)方法分解单应矩阵,解算出无人机相对视觉标志的姿态角,并根据相机成像构成的相似三角形原理计算出无人机相对视觉标志的位置数据。

2 无人机视觉姿态估计算法

无人机姿态估计算法的目的是通过无人机采集到包含视觉标志的图像,快速获得无人机相对于视觉标志的姿态。考虑到算法的可比较性和通用性,本文算法仍采用由圆环和 H 形标志组成的标准直升机停机坪作为视觉标志,如图 2 所示。

2.1 图像预处理

将机载摄像头采集到的彩色图像转换为灰度图像,以消除算法对图像色彩的依赖^[16],减少计算量并消除色调和饱和度信息而只保留亮度信息,提高标志提取的准确度,转换过程为

$$Y=0.299r+0.596g+0.211b \tag{1}$$

式中 Y ——转换后的灰度图像

r 、 g 、 b ——彩色图像中的红色、绿色和蓝色分量值

转换结果如图 3a 所示。

考虑到无人机的振动或外界天气条件的影响,由机载摄像头采集到的图像可能会变模糊^[6],因此,采用维纳滤波器^[17]对灰度图进行去模糊处理,

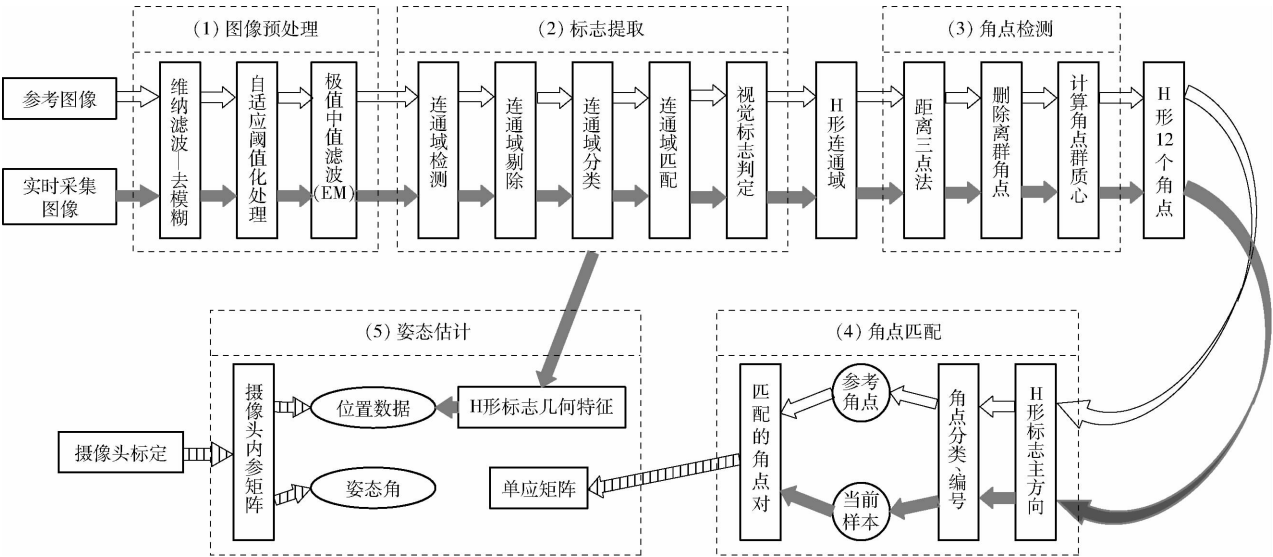


图 1 基于视觉的旋翼无人机姿态估计算法总体框图

Fig. 1 Overall framework of pose estimation algorithm of rotor UAV based on vision



图 2 视觉识别标志

Fig. 2 Visual identification mark

消除图像模糊的对比结果如图 3b 所示,维纳滤波器表达式为

$$\begin{aligned} \hat{F}(u,v) &= \frac{H^*(u,v)S_f(u,v)}{S_f(u,v)|H(u,v)|^2 + S_\eta(u,v)}G(u,v) = \\ &= \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \frac{S_\eta(u,v)}{S_f(u,v)}}G(u,v) = \\ &= \frac{1}{\frac{H(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \frac{S_\eta(u,v)}{S_f(u,v)}}}G(u,v) \end{aligned} \quad (2)$$

其中
式中
 $\hat{F}(u,v)$ ——去模糊后图像的傅里叶变换函数
 $H(u,v)$ ——退化函数
 $H^*(u,v)$ ——退化函数的复数共轭
 $S_\eta(u,v)$ ——噪声功率谱
 $S_f(u,v)$ ——信号功率谱
 $G(u,v)$ ——噪声图像的傅里叶变换函数

由于视觉标志中背景和标志具有较大的亮度差,为了明显区分高亮度的视觉标志和低亮度的背景,对维纳滤波后的图像进行自适应阈值化处理^[18],得到黑色背景和白色标志,如图 3c 所示。从

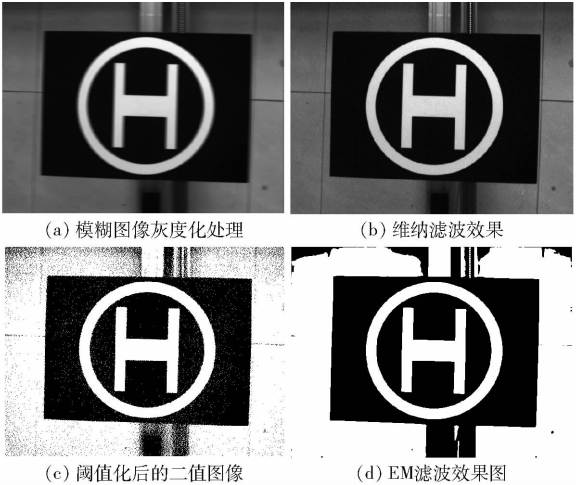


图 3 图像预处理结果

Fig. 3 Image preprocessing results

图 3c 中可看到,在对图像进行阈值化处理的过程中,会引入脉冲噪声和椒盐噪声。考虑到标准中值滤波对所有像素采用统一的处理方法,在滤除噪声的同时,也可能改变真正信号点的值,造成图像失真。因此,利用极值中值滤波器(EM)^[19]对阈值化结果做进一步的处理,由于 EM 滤波器只对噪声点进行中值处理而对信号点保留原像素值,可以有效消除图像的脉冲噪声和椒盐噪声,同时保留图像的边缘信息,滤波结果如图 3d 所示,EM 原理式为

$$y_{ij} = \begin{cases} \text{med}(W[x_{ij}]) & (x_{ij} = \min(W[x_{ij}]) \text{ 或 } x_{ij} = \max(W[x_{ij}])) \\ x_{ij} & (\min(W[x_{ij}]) < x_{ij} < \max(W[x_{ij}])) \end{cases} \quad (3)$$

式中 y_{ij} ——输出图像(i,j 表示各像素点的位置)
 $\text{med}(W[x_{ij}])$ ——对窗口 $W[x_{ij}]$ 内的所有点取中值函数

$\min(W[x_{ij}])$ ——对窗口 $W[x_{ij}]$ 内的所有点
取最小值函数
 $\max(W[x_{ij}])$ ——对窗口 $W[x_{ij}]$ 内的所有点
取最大值函数
 x_{ij} ——输入图像

2.2 标志提取

经图像预处理得到二值图像后,就可以对图像中的视觉标志进行提取。本文提出的标志提取方法分为 5 个步骤,包括连通域检测、连通域剔除、连通域分类、连通域匹配与视觉标志判定,称之为五步法。其核心思想就是利用视觉标志中圆环和 H 形标志固有的几何特征,对得到的二值图像进行快速标志提取。

通过检测图像中的所有连通域,得到每一个连通域的质心坐标、面积以及周长等特征。由于标志所处环境的光照、阴影等因素的影响,得到的连通域中包含一些小面积区域,因此,为了减少候选连通域的数量,首先删除候选连通域中的小面积区域。然后,分别根据圆环和 H 形标志自身的几何特征对剩余连通域进行筛选和分类,得到圆环和 H 形候选连通域。

最后,根据 H 形连通域位于圆环连通域内部并且其质心位置重合的条件,通过判断圆环连通域与 H 形连通域的质心间的欧氏距离,分别对两类候选连通域进行筛选。进一步,根据 H 形与圆环连通域的面积比和周长比,对剩余连通域进行判定,完成视觉标志提取。具体提取步骤如下:

(1) 连通域检测

对二值图像进行连通域检测,得到包含视觉标

志的所有连通域 $B[i] (i = 1, 2, \dots, n, n \text{ 为连通域数量})$ 及其几何特征,如图 4a 所示。可以看到,共检测到 9 个候选连通域,分别以不同颜色表示,黑色表示背景,候选连通域中有许多错误的连通域,其中包含一些面积很小的区域,即像素很少的连通域。

(2) 连通域剔除

此步骤主要删除上述连通域检测过程中得到的一些小面积区域。

如果第 i 个连通域的面积 $B[i]_{\text{Area}}$ 小于阈值 T_{Area} ,那么从候选连通域删除该连通域,更新候选连通域,如图 4b 所示。可以看到,经连通域剔除后,面积较小的连通域 5、6、8 被删除,减少了候选连通域的数量。

(3) 连通域分类

根据 H 形标志和圆环的几何特征对更新后的候选连通域进行分类,分为 H 形连通域和圆环连通域。根据 H 形标志和圆环自身面积-周长比的尺度不变性和旋转不变性,对候选连通域进行分类。如果第 i 个连通域的面积-周长比与 H 形连通域的面积-周长比的期望值相差很小,即满足

$$\left| \frac{B[i]_{\text{Area}}}{B[i]_{\text{Perimeter}}} - R_{A-P}^H \right| < \varepsilon_{A-P} \quad (4)$$

式中 $B[i]_{\text{Perimeter}}$ ——第 i 个连通域的周长
 R_{A-P}^H ——H 形连通域面积-周长比的期望值
 ε_{A-P} ——连通域面积-周长比阈值
则将该连通域标记为 H 形候选连通域 $B_H[j] (j = 1, 2, \dots, m_1, m_1 \text{ 为 H 形候选连通域的数量})$ 。

如果第 i 个连通域的面积-周长比与圆环连通域的面积-周长比的期望值相差很小,即满足

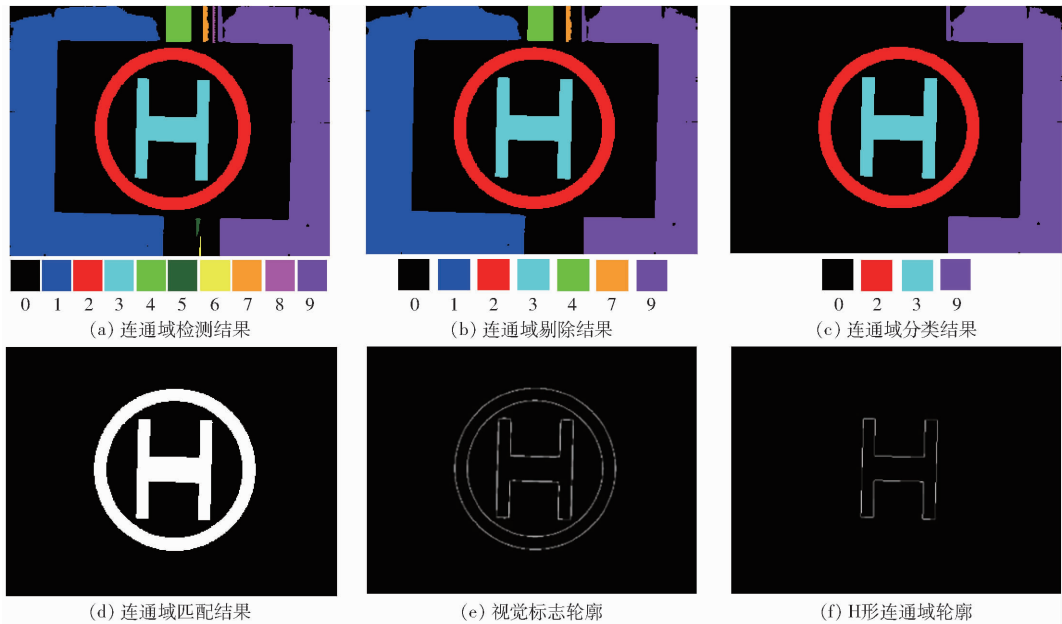


图 4 标志提取结果

Fig. 4 Mark extraction results

$$\left| \frac{B[i]_{\text{Area}}}{B[i]_{\text{Perimeter}}} - R_{A-P}^{\text{Cir}} \right| \leq \varepsilon_{A-P} \quad (5)$$

式中 R_{A-P}^{Cir} ——圆环连通域面积-周长比的期望值
 则将该连通域标记为圆环候选连通域 $B_{\text{Cir}}[k]$ ($k = 1, 2, \dots, m_2, m_2$ 为圆环候选连通域的数量); 否则, 直接从候选连通域中删除。

连通域分类结果如图 4c 所示, 可以看出, H 形候选连通域有 2 个, 对应连通域 3、9, 圆环候选连通域有 1 个, 对应连通域 2。

(4) 连通域匹配

根据 H 形连通域与圆环连通域质心位置重合的关系, 通过计算两类连通域质心间的欧氏距离, 对 H 形候选连通域 $B_H[j]$ 和圆环候选连通域 $B_{\text{Cir}}[k]$ 进行匹配, 进而得到候选视觉标志 $V_{\text{Marks}}[i]$ ($i = 1, 2, \dots, N, N$ 为候选视觉标志的数量), 即 H 形连通域与圆环连通域的对应表。

如果第 i 个 H 形连通域与第 j 个圆环连通域质心间的欧氏距离小于设定阈值 ε_{Dis} , 则将对应的 H 形连通域和圆环连通域标记为候选视觉标志 $V_{\text{Marks}}[i]$, 即更新对应表, 判定条件式为

$$\text{EucliDist}(B_H[i]_{\text{Centroid}}, B_{\text{Cir}}[j]_{\text{Centroid}}) \leq \varepsilon_{\text{Dis}} \quad (6)$$

式中 $B_H[i]_{\text{Centroid}}$ ——第 i 个 H 形连通域的质心坐标
 $B_{\text{Cir}}[j]_{\text{Centroid}}$ ——第 j 个圆环连通域的质心坐标
 $\text{EucliDist}(\cdot)$ ——计算两点间欧氏距离函数

连通域匹配结果如图 4d 所示, 可以看出, 实验图像中只得到一个匹配的视觉标志, 即期望的 H 形标志和圆环。但是, 如果采集到的图像中存在干扰信息, 将得到不止一个视觉标志, 因此, 需对得到的视觉标志做进一步的判定。

(5) 视觉标志判定

利用 H 形连通域和圆环连通域的面积比和周长比, 对连通域匹配得到的候选视觉标志做进一步的判定和确认。

如果第 i 个视觉标志中对应的 H 形连通域与圆环连通域的面积比和周长比与期望的面积比和周长比相差很小, 则标记为最终的视觉标志; 否则, 将该视觉标志从候选视觉标志中删除, 判定条件式为

$$\begin{cases} \left| \frac{V_{\text{Marks}}[i]_{\text{HArea}}}{V_{\text{Marks}}[i]_{\text{CirArea}}} - R_{\text{Area}}^{\text{H-Cir}} \right| \leq \varepsilon_{\text{Area}} \\ \left| \frac{V_{\text{Marks}}[i]_{\text{HPerimeter}}}{V_{\text{Marks}}[i]_{\text{CirPerimeter}}} - R_{\text{Perimeter}}^{\text{H-Cir}} \right| \leq \varepsilon_{\text{Perimeter}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $V_{\text{Marks}}[i]_{\text{HArea}}$ ——第 i 个视觉标志中 H 形连通域的面积

$V_{\text{Marks}}[i]_{\text{CirArea}}$ ——第 i 个视觉标志中圆环连通域的面积

$V_{\text{Marks}}[i]_{\text{HPerimeter}}$ ——第 i 个视觉标志中 H 形

连通域的周长

$V_{\text{Marks}}[i]_{\text{CirPerimeter}}$ ——第 i 个视觉标志中圆环

连通域的周长

$R_{\text{Area}}^{\text{H-Cir}}$ ——H 形连通域和圆环连通域面积比的期望值

$R_{\text{Perimeter}}^{\text{H-Cir}}$ ——H 形连通域和圆环连通域周长比的期望值

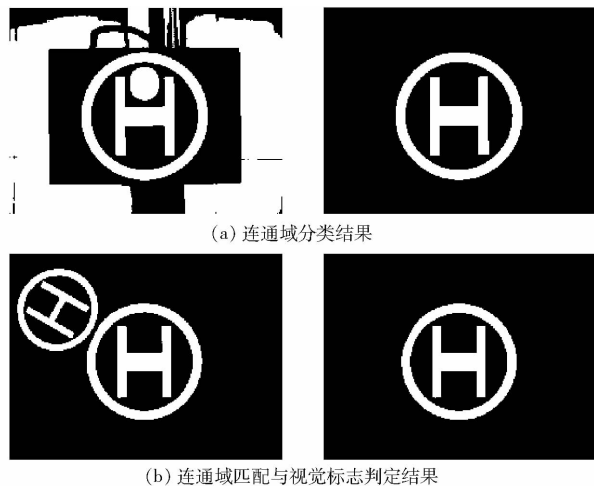
$\varepsilon_{\text{Area}}$ ——面积比阈值

$\varepsilon_{\text{Perimeter}}$ ——周长比阈值

经过上述连通域检测和筛选, 可以提取出唯一期望的视觉标志, 即标准直升机停机坪所包含的圆环及其内部的 H 形标志, 进而可以得到视觉标志的边缘轮廓, 如图 4e 所示。

在角点检测、角点匹配及无人机姿态估计过程中, 只需要 H 形标志的 12 个角点信息, 而不需要圆环的相关信息。因此, 将主要提取 H 形连通域的轮廓, 如图 4f 所示。将 H 形连通域的轮廓坐标顺序排列在一个列向量中, 作为角点检测的输入。

此外, 图 5 给出了标志提取过程可能存在的两种干扰情况。图 5a 给出由于标志表面杂质或光线反射的影响, 在 H 形和圆环连通域之间出现面积较大的白色斑点, 本文提出方法仍可准确地完成两类标志的分类; 图 5b 给出在连通域匹配过程中得到两个候选视觉标志, 通过视觉标志判定最终得到了期望的视觉标志。可见本文算法具有一定的鲁棒性。



(a) 连通域分类结果

(b) 连通域匹配与视觉标志判定结果

图 5 干扰情况下的标志提取结果

Fig. 5 Mark extraction results under disturbed condition

2.3 角点检测

角点检测的目标是找到 H 形标志的 12 个角点位置, 目前存在许多角点检测算法, 主要分为基于灰度图像的角点检测、基于二值图像的角点检测和基于轮廓曲线的角点检测^[20-21]。但上述方法都会出现错检或漏检的情况, 并且计算量较大, 很难满足无人机姿态估计的实时性要求。因此, 本文提出一种

基于距离三点法的几何方法来检测角点,可有效提升运算速度。

基于距离三点法的角点检测方法根据上述标志提取得到的 H 形连通域轮廓,对目标轮廓的每一个像素点进行检测。假设点 S 是一个待检测的像素种子点,根据一定的步长 L_{step} 沿 H 形轮廓在种子点 S 的左右两侧分别取 P_1 、 P_2 两个相邻点,并得到通过点 P_1 、 P_2 的直线方程,从而可以计算种子点 S 到直线的距离 d_s ,如图 6 所示。从图中可以看到,一个理想的角点对应一个较大的距离,而距离越小表示种子点与相邻点越接近一条直线,当距离为 0 时,三点共线。利用这一关系,通过判断种子点 S 对应的距离 d_s ,就可以检测到所有可能的候选角点,计算如下

$$f(S) = \begin{cases} 1 & (d_s \geq T_{\text{Dis}}) \\ 0 & (d_s < T_{\text{Dis}}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f(S)$ ——种子点的检测结果

T_{Dis} ——根据步长 L_{step} 得到的距离阈值

$f(S) = 1$ 表示 S 为可能的候选角点, $f(S) = 0$ 表示 S 为非角点。

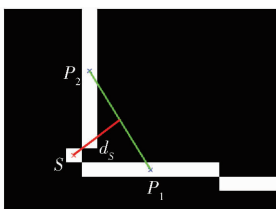


图 6 角点检测原理

Fig. 6 Corner detection principle

在角点检测过程中,种子点 S 沿 H 形轮廓遍历每一个像素点,步长 L_{step} 根据 H 形轮廓的边长值确定,边长越长,步长越大,边长越小,步长越小,关系式为

$$L_{\text{step}} = \alpha l \quad (9)$$

式中 α ——小于 1 的步长因子

l ——H 形轮廓最短边的长度

这样,由于无人机高度不同而引起的 H 形轮廓边长的变化不会影响角点检测的准确性,使得角点检测算法的鲁棒性更好。

为了排除上述步骤得到的 H 形轮廓所有候选角点中的离群点,即假角点,利用 H 形标志的尺寸关系对所有候选角点进行筛选。具体步骤如下:

(1) 确定所采用的 H 形标志的尺寸关系。从图 7 中可以看到, H 形标志的 12 个角点到其质心 O_H 的距离只有 3 种情况,分别为到最外侧 4 个角点的最大距离 $d_{\text{max}} = 5l$; 到最内侧 4 个角点的最小距离 $d_{\text{min}} = \sqrt{5}l$; 以及到中间 4 个角点的中间距离 $d_{\text{mid}} =$

$\sqrt{20}l$, 并且 H 形标志轮廓的周长 $P_H = 40l$ 。由此可知,通过标志提取得到的 H 形标志轮廓的周长,就可以计算出 H 形轮廓的最短边长 l ,从而在 H 形轮廓大小不同的情况下,都能够得到 12 个角点到其质心的 3 个期望距离 d_{max} 、 d_{min} 、 d_{mid} 。

(2) 计算所有候选角点到 H 形标志质心的欧氏距离,并与 3 个期望的距离进行比较,如果与 3 个期望距离的任意一个的差值小于阈值 $\delta_{\text{CornerDet}}$,则标记为候选角点,否则认为是离群点,从候选角点中删除,其中 $\delta_{\text{CornerDet}}$ 根据 H 形轮廓的最短边计算得到,公式为

$$\delta_{\text{CornerDet}} = \beta l \quad (10)$$

式中 β ——小于 1 的比例因子

筛选判定条件式为

$$\begin{cases} |d_{\text{Corner} - O_H}^{\text{Actual}} - d_{\text{max}}| \leq \delta_{\text{CornerDet}} \\ |d_{\text{Corner} - O_H}^{\text{Actual}} - d_{\text{min}}| \leq \delta_{\text{CornerDet}} \\ |d_{\text{Corner} - O_H}^{\text{Actual}} - d_{\text{mid}}| \leq \delta_{\text{CornerDet}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $d_{\text{Corner} - O_H}^{\text{Actual}}$ ——H 形轮廓角点到其质心的实际距离

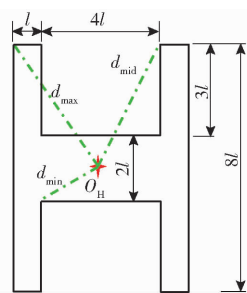


图 7 H 形标志的尺寸关系

Fig. 7 Dimension of H shaped mark

经过上述角点检测,可以得到 12 个角点群,如图 8a 所示。通过计算一个小邻域内角点群的质心,可以得到 12 个角点群的质心,将其作为最终检测到的 H 形标志角点位置,如图 8b 所示。

2.4 角点匹配

角点匹配是无人机姿态估计的另一个关键环节,本文算法将当前图像中的角点与参考图像中的

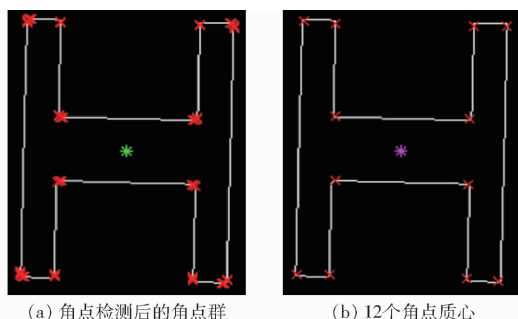


图 8 角点检测结果

Fig. 8 Corner detection results

角点进行匹配,从而准确估计出无人机的姿态信息。角点匹配步骤如下:

- (1) 根据 2.3 节角点检测得到的 H 形标志 12 个角点,首先确定 H 形标志的主方向。由于 H 形标志的轮廓坐标按顺序排列进行存储,因此,由角点检测方法得到的 12 个角点同样沿 H 形轮廓顺序存储。通过顺序计算相邻两个角点的距离,可以得到角点间的 12 个距离,即 H 形标志的 12 条边长,如图 9a 所示。
- (2) 比较得到的 12 个距离,取最大的距离所对应的两个角点所在的直线斜率作为 H 形标志的主

方向,即 H 形标志的垂直方向,如图 9b、9c 中红色线段所示。与主方向垂直的方向定义为 H 形标志的水平方向,如图 9c 中绿色线段所示。这样,H 形标志被划分为 4 个象限,分别为第 I 象限、第 II 象限、第 III 象限和第 IV 象限。

- (3) 根据角点到质心欧氏距离的 3 种情况,将每个象限中的 3 个角点分类并进行编号,分为外点、中点和内点,如图 9c 所示。这样,就可以与参考图像中定义的角点完成匹配,如图 10 所示,从而得到 12 个匹配的角点对,将其作为无人机姿态估计的输入参数。

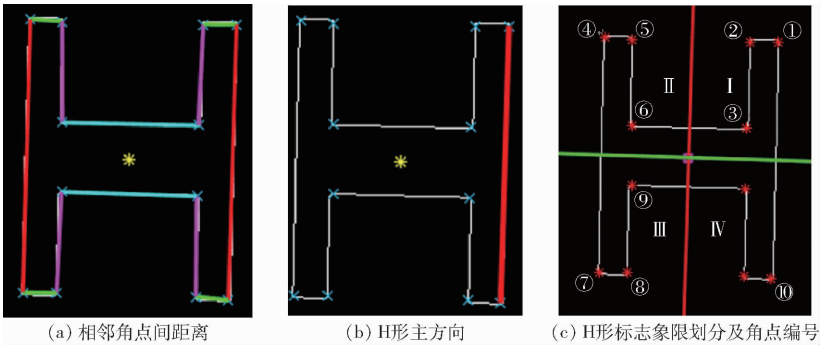


图 9 角点匹配

Fig. 9 Corner matching

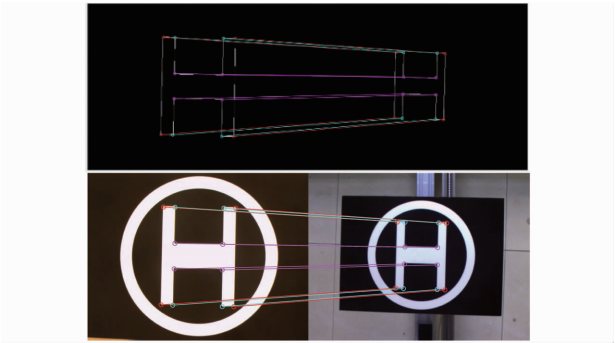


图 10 当前图像与参考图像角点匹配结果(左边为参考图像,右边为当前图像)

Fig. 10 Corner matching results between current image and reference image (Left picture was reference, and right one was current image)

根据上述角点匹配算法,分别对不同位移和旋转情况下所得到的图像与参考图像进行角点匹配测试,匹配结果如图 11 所示。从图中可以看出,该算法对无人机的平移(图 11a)、旋转(图 11b)甚至无人机产生剧烈倾斜的极端情况(图 11c)都能实现精确的匹配。

2.5 无人机姿态估计

无人机的姿态估计,即根据上述得到的 12 个匹配的角点对,估计出无人机相对于视觉标志的三维姿态。为了消除摄像头畸变对无人机姿态估计精度的影响,首先对摄像头进行标定,获得摄像头的内参

矩阵。

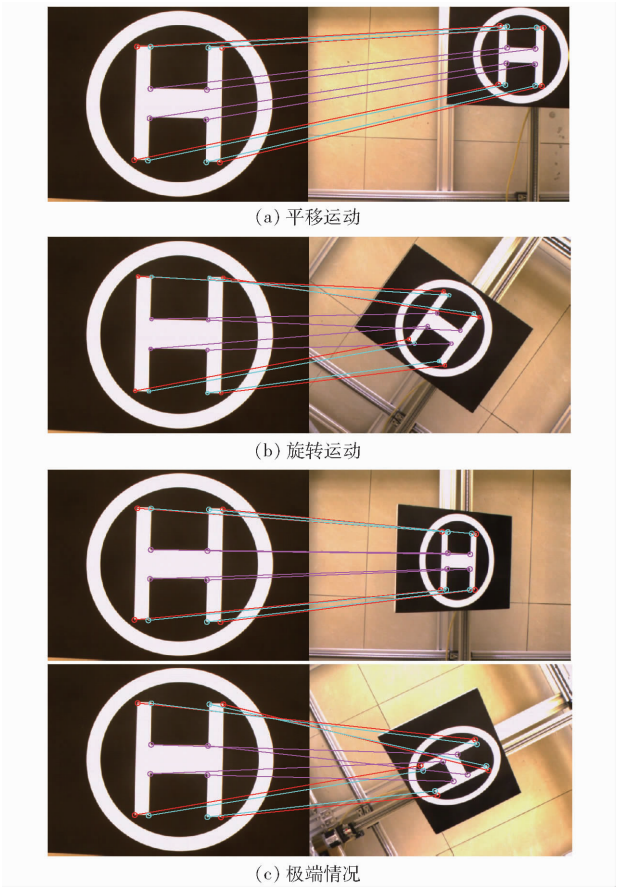


图 11 角点匹配测试

Fig. 11 Corner matching test

二维像素坐标与三维世界坐标的对应关系式为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R | t] P \quad (12)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \alpha & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R | t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中 s ——尺度因子

$[u \ v \ 1]^T$ ——像素坐标系中的齐次坐标

K ——相机内部参数矩阵

$[R | t]$ ——相机外部参数矩阵

R ——相机旋转矩阵 t ——相机平移向量

P ——世界坐标系中的齐次坐标

其次,利用匹配的 12 个角点对,根据直接线性变换 (DLT) 可以计算出相应的单应矩阵^[22],利用非奇异值分解 (Singular value decomposition, SVD) 对单应矩阵进行分解^[23],可以得到旋转矩阵 R 和平移向量 t ,从而根据旋转矩阵解算出无人机的姿态角

$$\begin{cases} \theta_x = \arctan(r_{32}, r_{33}) \\ \theta_y = \arctan(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) \\ \theta_z = \arctan(r_{21}, r_{11}) \end{cases} \quad (13)$$

式中 θ_x ——无人机绕 x 轴旋转角,即横滚角

θ_y ——无人机绕 y 轴旋转角,即俯仰角

θ_z ——无人机绕 z 轴旋转角,即偏航角

在位置估计中,由于单目相机在三维重建过程中存在尺度不确定的问题,本文利用针孔相机成像原理,通过三角形相似关系对当前图像中 H 形标志质心的深度进行估计。相机成像原理如图 12 所示,空间中任意一点在相机坐标系下的坐标 $M(X, Y, Z)$ 与成像后图像中对应坐标 $m(x, y)$ 的关系可根据三角形相似性得出,即

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (14)$$

式中 f ——相机焦距

本文分别通过面积和周长对标志质心深度进行估计,取其平均值作为最终的标志质心深度值,并由此计算出 H 形标志质心相对于相机光心的 x 坐标和 y 坐标,实验表明,该方法可以较精确地估计出标志质心的深度。

$$\frac{S_{\text{pixel}} d_{\text{pixel}}^2}{S_{\text{actual}}} = \frac{f^2}{D_{\text{Area}}^2} \quad (15)$$

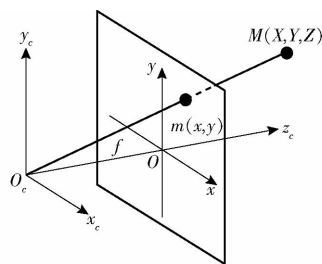


图 12 针孔相机成像原理

Fig. 12 Imaging principle of pinhole camera

式中 S_{pixel} ——H 形标志的像素面积

d_{pixel} ——相机的像元尺寸

S_{actual} ——H 形标志的真实面积

D_{Area} ——由面积相似求得的标志质心深度

$$\frac{P_{\text{pixel}} d_{\text{pixel}}}{P_{\text{actual}}} = \frac{f}{D_{\text{Perimeter}}} \quad (16)$$

式中 P_{pixel} ——H 形标志的像素周长

P_{actual} ——H 形标志的真实周长

$D_{\text{Perimeter}}$ ——由周长相似求得的标志质心深度

最终得到 H 形标志质心相对于相机光心的坐

标 (x_H, y_H, z_H) 为

$$\begin{cases} x_H = \frac{z_H x_{\text{error}} d_{\text{pixel}}}{f} \\ y_H = \frac{z_H y_{\text{error}} d_{\text{pixel}}}{f} \\ z_H = \frac{D_{\text{Area}} + D_{\text{Perimeter}}}{2} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $x_{\text{error}}, y_{\text{error}}$ ——图像中 H 形标志质心与图像中心在 x 方向和 y 方向的像素偏差

3 实验验证与结果分析

为验证本文所提算法的有效性和准确性,并考虑到直接通过无人机采集图像难以准确获得图像对应的无人机姿态信息,不利于算法的验证,因此,在实验室搭建了视觉实验平台来模拟无人机的运动并获取图像数据,将图像输入本文算法,通过比较算法输出的估计值和测量真实值之间的误差,对算法有效性和准确性进行验证,并测算所提出算法的时间性能。

3.1 实验平台及参数选择

搭建的视觉实验平台如图 13 所示,分别由沿 x, y, z 方向移动的平移单元和绕 x, y, z 轴旋转的旋转单元组成,以模拟无人机飞行过程中的 6 个自由度。

通过 3 组电动丝杠模拟无人机沿 x, y, z 方向的平移运动,其中 y 方向移动单元安装在 x 方向移动单元上,如图 13a 所示。3 个旋转台用于模拟无人

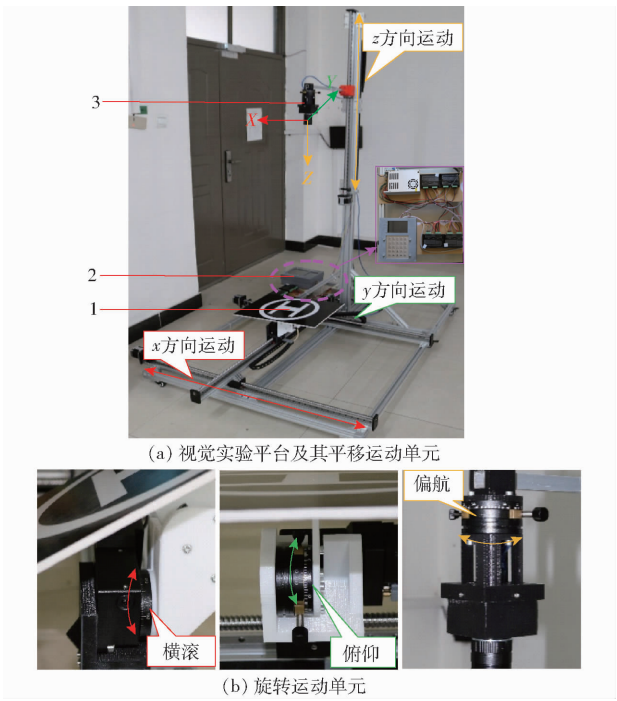


图 13 视觉实验平台

Fig. 13 Visual experiment platform

1. 视觉标志 2. 控制和驱动单元 3. 摄像头

机绕 x 、 y 、 z 轴的旋转运动,如图 13b 所示。其中横滚和俯仰旋转台安装在 y 方向移动单元上,在俯仰旋转台上方固定有视觉标志,偏航旋转台通过一个连杆安装在 z 方向移动单元上,偏航旋转台下方安装垂直向下的摄像头,用于获取包含视觉标志的图像。通过控制和驱动单元调节平移运动单元和旋转运动单元,就可以模拟无人机相对于视觉标志的位置和姿态角,并通过计算机采集摄像头捕获的图像数据。

本文所使用的摄像头是一台分辨率为 640 像素 $\times$ 480 像素的 USB 接口单目相机,视觉标志检测及姿态估计算法运行在计算机上。本文所提出算法中的具体参数选择如表 1 所示。

表 1 算法参数

Tab.1 Algorithm parameters

参数	数值
$T_{Area}/\text{像素}$	200
$\varepsilon_{A-p}/\text{像素}$	0.0035
$\varepsilon_{Dis}/\text{像素}$	150
ε_{Area}	0.08
$\varepsilon_{Perimeter}$	0.08
$T_{Dis}/\text{像素}$	$0.5L_{step}$
α	0.3
β	0.4

3.2 标志提取与角点检测算法验证

为了验证本文标志提取及角点检测算法的有效

性,分别采用视觉实验平台和四旋翼无人机共拍摄 800 幅包含视觉标志的测试图像,并对其进行标志提取和角点检测,通过评价检测结果的准确率,对标志提取和角点检测算法的准确性和有效性进行验证,其中,视觉平台所拍摄的图像包含了摄像头与标志间 0.5 ~ 1.5 m 的距离范围,并且加入了其余 5 个自由度的运动,无人机所拍摄的图像包含了 1.5 ~ 7.5 m 的距离范围。实验中所用的四旋翼无人机如图 14 所示,在无人机下方中心位置垂直向下安装单目相机,并搭载了图像处理单元、飞控模块、惯性测量单元 IMU 和 GPS 模块。其中,单目相机用于采集图像,图像处理单元搭载本文视觉姿态估计算法用于进行图像处理并给出无人机的控制命令,飞控模块、惯性测量单元和 GPS 模块用于根据控制命令调节无人机的位置。

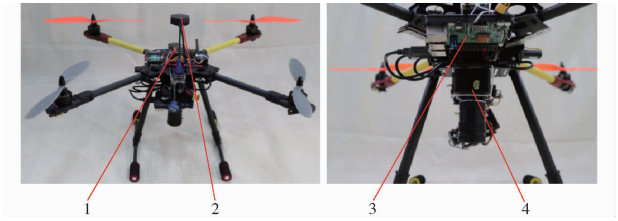


图 14 四旋翼无人机

Fig. 14 Quadrotor UAV platform

1. 飞控模块和 IMU 2. GPS 3. 图像处理单元 4. 单目相机

在测试过程中,视觉实验平台所拍图像的预处理过程将维纳滤波器关闭,而无人机所拍图像的预处理过程将维纳滤波器打开,因为无人机在飞行过程中可能会发生抖动。

视觉实验平台拍摄的部分图像及其检测结果如图 15 所示,四旋翼无人机拍摄的部分图像及其检测结果如图 16 所示,图中从左到右分别为原始图像、图像预处理结果、标志提取结果和角点检测结果。

从图 15 中可以看到,当摄像头与标志间的距离在 0.5 ~ 1.5 m 范围内时,本文算法可以准确提取出图像中的视觉标志并得到 H 形标志的 12 个角点。

从图 16 中可以看到,当无人机高度不大于 5.0 m 时,可以准确提取出视觉标志并完成角点检测,但随着无人机飞行高度的继续上升,图像中的视觉标志变小,标志提取和角点检测会出现错误。当高度大于 5.0 m 时,角点检测出现漏检现象,如图 16b 所示,当高度大于 7.0 m 时,已经无法完整、准确地提取出视觉标志,如图 16a 所示。无人机飞行高度在 0 ~ 5.0 m 时,本文算法可以精确地提取出视觉标志并得到 12 个角点位置,可以满足无人机自主降落的要求。

此外,由于天气原因,无人机会发生小幅度的抖动,所拍摄的图像受到一定的影响,如图 16e 所示。

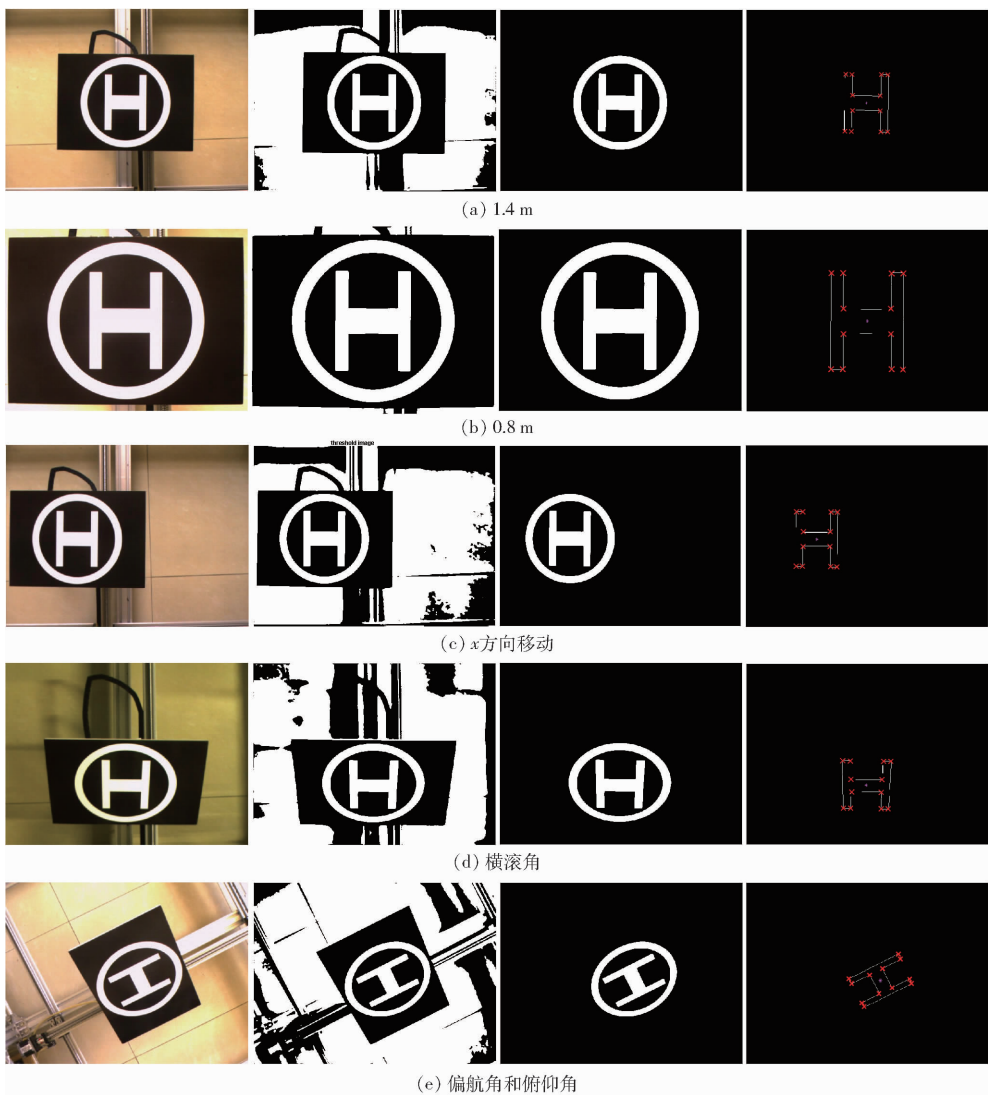


图 15 视觉实验平台上标志提取与角点检测效果

Fig. 15 Results of mark extraction and corner detection in visual experiment platform

如果关闭维纳滤波器,会出现标志提取错误的情况,实际上,丢失了重要标志 H 形字符,如图 16e 第 3 个图像中左下角红色方框内的图像;而经过维纳滤波、极值中值滤波等图像预处理后,可以得到较好的二值图像,并可以提取出正确的视觉标志,完成角点检测。

由于目前的研究还没有完全实现视觉算法与飞控的结合,并正在进一步研究,以上实验过程只通过单目相机和图像处理单元采集无人机航拍图像,然后由计算机进行仿真实验。

为了进一步验证本文所提算法的有效性和可行性,将部分视觉算法移植到树莓派,并在脱机状态下对采集的图像进行处理,树莓派处理单元运行效果如图 17 所示。

未来进一步的研究将重点完成视觉算法的移植及其与飞控的结合,并在四旋翼无人机上对算法进行更进一步的实验验证。视觉算法与飞控的结合框图如图 18 所示。

从图 18 中可以看出,视觉算法与飞控模块独立运行。视觉算法对采集到的图像进行标志提取、角点检测以及姿态估计等处理,从而计算出无人机与标志的相对姿态并给出无人机姿态调整指令;飞控模块接收到视觉算法的控制指令并进行解析,得到无人机姿态调整的具体参数,控制无人机完成姿态调整并下降一定高度,之后进入旋停状态,等待下一次控制指令的输入,经过多次图像处理与姿态调整,最终完成无人机的自主着陆。

3.3 姿态估计验证

为验证本文提出的无人机姿态估计算法的有效性,分别对无人机相对于标志的姿态角估计和位置估计进行了实验验证。

首先,对每一个旋转单元以 4° 的步长进行旋转,锁定其他平移运动单元和旋转单元以获得不同姿态角下的图像数据,将其输入提出的算法,分别对视觉标志的横滚角、俯仰角和偏航角进行估计,并计算估计值与真实值之间的绝对误差和相对误差,实



图 16 室外环境下标志提取与角点检测效果

Fig. 16 Results of mark extraction and corner detection in outdoor

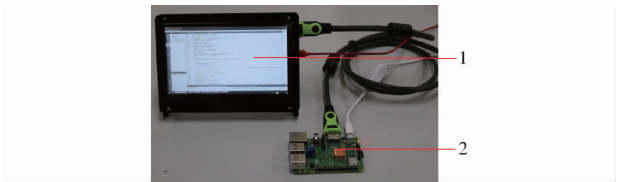


图 17 树莓派运行效果

Fig. 17 Raspberry Pi running effect

1. 液晶显示屏 2. 树莓派处理单元

验结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,横滚角和俯仰角的最大绝对误差在 0.5°左右,分别为 0.504 7°和 0.588 5°,最大相对误差为 2.76% 和 2.50%,而偏航角的最大绝对误差为 0.207 7°,最大相对误差为 1.44%,小于横滚角和俯仰角的误差。分析可能是由于在角点检测过程中,将角点群的质心作为 H 形标志的最终角点位置会引入一定的误差,在视觉标志发生倾斜时这一误差大于视觉标志旋转时的误差,因此,造成了横滚

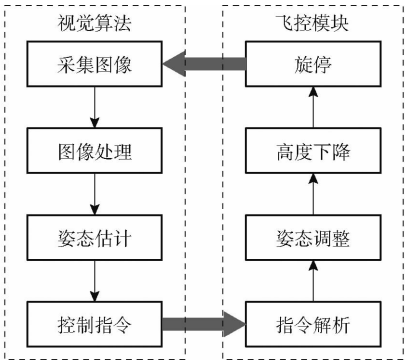


图 18 视觉算法与飞控结合框图

Fig. 18 Block diagram of combination of visual algorithms and flight control

角和俯仰角估计的误差大于偏航角估计的误差。

实验中得到较小的均方根误差可以表明本文算法对姿态角估计的准确性和有效性。从表 2 中可以看出,本文算法对姿态角估计的平均均方根误差为 0.223°,明显优于 LIN 等^[13]提出的方法,其平均均

表 2 姿态角估计结果

Tab.2 Attitude angle estimation result

姿态角	真实值/ ($^{\circ}$)	估计值/ ($^{\circ}$)	绝对误差/ ($^{\circ}$)	相对 误差/%
横滚角	-36.50	-36.976 2	0.476 2	1.30
	-32.50	-33.004 7	0.504 7	1.55
	-28.50	-28.853 1	0.353 1	1.24
	-24.50	-24.350 3	0.149 7	0.61
	-20.50	-20.508 7	0.008 7	0.04
	-16.50	-16.589 2	0.089 2	0.54
	-12.50	-12.410 3	0.089 7	0.72
	-8.50	-8.633 9	0.133 9	1.58
	-4.50	-4.579 8	0.079 8	1.77
	-0.50	-0.489 7	0.010 3	2.06
	3.50	3.403 4	0.096 6	2.76
	7.50	7.587 7	0.087 7	1.17
	11.50	11.315 2	0.184 8	1.61
	15.50	15.670 7	0.170 7	1.10
	19.50	19.381 1	0.118 9	0.61
	23.50	23.287 7	0.212 3	0.90
俯仰角	27.50	27.161 3	0.338 7	1.23
	31.50	31.820 7	0.320 7	1.02
	35.50	35.889 8	0.389 8	1.10
	均方根误差/($^{\circ}$)		0.249	
	-39.50	-39.581 0	0.081 0	0.21
	-35.50	-36.023 5	0.523 5	1.47
	-31.50	-31.215 3	0.284 7	0.90
	-27.50	-27.256 9	0.243 1	0.88
	-23.50	-24.088 5	0.588 5	2.50
	-19.50	-19.897 7	0.397 7	2.04
	-15.50	-15.445 5	0.054 5	0.35
	-11.50	-11.424 7	0.075 3	0.65
	-7.50	-7.579 2	0.079 2	1.06
	-3.50	-3.585 9	0.085 9	2.45
	0.50	0.489 1	0.010 9	2.18
	4.50	4.561 5	0.061 5	1.37
偏航角	8.50	8.549 8	0.049 8	0.59
	12.50	12.428 0	0.072 0	0.58
	16.50	16.793 7	0.293 7	1.78
	20.50	20.102 6	0.397 4	1.94
	24.50	25.002 6	0.502 6	2.05
	28.50	28.884 0	0.384 0	1.35
	32.50	32.790 1	0.290 1	0.89
	36.50	36.794 2	0.294 2	0.81
	40.50	41.043 3	0.543 3	1.34
	均方根误差/($^{\circ}$)		0.313	
	-39.50	-39.551 6	0.051 6	0.13
	-35.50	-35.443 2	0.056 8	0.16
	-31.50	-31.707 7	0.207 7	0.66
	-27.50	-27.703 4	0.203 4	0.74
	-23.50	-23.614 0	0.114 0	0.49
	-19.50	-19.486 4	0.013 6	0.07
偏航角	-15.50	-15.362 8	0.137 2	0.89
	-11.50	-11.526 1	0.026 1	0.23
	-7.50	-7.587 4	0.087 4	1.17
	-3.50	-3.550 3	0.050 3	1.44
	0.50	0.494 6	0.005 4	1.08
	4.50	4.450 9	0.049 1	1.09
	8.50	8.425 7	0.074 3	0.87
	12.50	12.445 5	0.054 5	0.44
	16.50	16.635 7	0.135 7	0.82
	20.50	20.568 2	0.068 2	0.33
	24.50	24.415 8	0.084 2	0.34
	28.50	28.4462	0.0538	0.19
	32.50	32.2980	0.2020	0.62
	36.50	36.3675	0.1325	0.36
	40.50	40.4159	0.0841	0.21
	均方根误差/($^{\circ}$)		0.107	

方根误差为 1.786 $^{\circ}$ 。

其次,用相同的实验方法对算法的位置估计进行验证。分别将 x 、 y 、 z 平移单元以 0.05 m 的步长移动,对视觉标志与摄像头的相对位置进行估计,实验结果如表 3 所示。

表 3 位置估计结果

Tab.3 Position estimation result

平移单元	真实值/ m	估计值/ m	绝对误差/ m	相对误差/ %
x 方向	-0.35	-0.346 7	0.003 3	0.94
	-0.30	-0.301 5	0.001 5	0.50
	-0.25	-0.248 2	0.001 8	0.72
	-0.20	-0.198 1	0.001 9	0.95
	-0.15	-0.148 3	0.001 7	1.13
	-0.10	-0.098 8	0.001 2	1.20
	-0.05	-0.049 3	0.000 7	1.40
	0.05	0.049 6	0.000 4	0.80
	0.10	0.098 9	0.001 1	1.10
	0.15	0.148 7	0.001 3	0.87
	0.20	0.197 7	0.002 3	1.15
	0.25	0.247 9	0.002 1	0.84
	0.30	0.297 6	0.002 4	0.80
	0.35	0.348 6	0.001 4	0.40
	均方根误差/m		0.001 8	
	-0.30	-0.307 3	0.003 7	1.23
y 方向	-0.25	-0.248 0	0.002 0	0.80
	-0.20	-0.198 8	0.001 2	0.60
	-0.15	-0.149 3	0.000 7	0.47
	-0.10	-0.099 6	0.000 4	0.40
	-0.05	-0.050 1	0.000 1	0.20
	0.05	0.049 6	0.000 4	0.80
	0.10	0.099 7	0.000 3	0.30
	0.15	0.147 9	0.002 1	1.40
	0.20	0.199 6	0.000 4	0.20
	0.25	0.248 2	0.001 8	0.72
	0.30	0.298 3	0.001 7	0.57
	均方根误差/m		0.001 6	
	0.50	0.503 8	0.003 8	0.76
	0.55	0.550 9	0.000 9	0.16
	0.60	0.601 3	0.001 3	0.22
	0.65	0.651 1	0.001 1	0.17
z 方向 (距离)	0.70	0.703 4	0.003 4	0.49
	0.75	0.751 4	0.001 4	0.19
	0.80	0.798 3	0.001 7	0.21
	0.85	0.848 9	0.001 1	0.13
	0.90	0.901 9	0.001 9	0.21
	0.95	0.951 7	0.001 7	0.18
	1.00	0.998 3	0.001 7	0.17
	1.05	1.049 6	0.000 4	0.04
	1.10	1.098 6	0.001 4	0.13
	1.15	1.149 0	0.001 0	0.09
	1.20	1.207 9	0.007 9	0.66
	1.25	1.257 7	0.007 7	0.62
	1.30	1.305 4	0.005 4	0.42
	1.35	1.354 8	0.004 8	0.36
	1.40	1.410 3	0.010 3	0.74
	1.45	1.465 3	0.015 3	1.06
	1.50	1.515 9	0.015 9	1.06
	均方根误差/m		0.006 2	

从表 3 可以看出,在视觉标志与摄像头成像平面平行的情况下,位置估计的精度较高, x 、 y 、 z 方向的最大绝对误差分别为 0.003 3、0.003 7、0.015 9 m,最大相对误差分别为 1.40%、1.40%、1.06%。可以

看到, x 、 y 方向的最大相对误差和均方根误差基本相同, 因为 z 方向(即视觉标志与摄像头之间的距离)估计的误差会由位置估计算法等量地引入 x 方向和 y 方向。LIN 等^[13]提出的方法中, x 、 y 、 z 方向位置估计的平均均方根误差分别为 0.032、0.025、0.030 m, 而本文算法在 x 、 y 、 z 方向的最大均方根误差为 0.006 2 m, 因此, 本文算法具有更精确的位置估计。

3.4 时间性能测试

对本文提出算法的时间性能进行测试。为了与其他文献中的方法进行比较, 分别在 2 种不同测试平台上运行本文所提算法, 测试平台 1 是台式计算机(PC1), 硬件配置为 Intel Core i3 处理器, 主频 2.40 GHz, 4.0 GB 内存, 安装 64 位 Windows 7 操作系统, 软件环境为 Matlab R2015b(配置与文献[5]算法的运行环境相同); 测试平台 2 是一台便携式计算机(PC2), 硬件配置为 Intel Core i7 处理器, 主频 2.40 GHz, 4.0 GB 内存, 安装 64 位 Ubuntu 16.04 LTS 操作系统, 软件环境为 Matlab R2016b(配置与文献[6]算法的运行环境基本相同)。

从表 4 中可以看出, 本文算法在 PC2 上的时间性能更好, 平均标志检测时间为 89.7 ms, 平均姿态估计时间为 217.5 ms, 整个基于视觉的无人机姿态估计算法运行时间为 307.2 ms, 优于 PC1 上的性能。这是由于 PC2 拥有更好的配置, 因此, 算法在 PC1 上的时间性能低于 PC2。

此外, 本文算法在视觉标志检测过程中所需的时间略高于 LEE 等^[4]提出的方法, 但 LEE 等算法的运行环境为专用的板载处理器, 并且其所有算法均进行了优化, 可以得到较好的运行效果。相反, 本文算法的运行时间明显小于文献[5-6]提出的方法。

可以看出, 在相同运行环境的情况下, 本文算法分别比文献[5-6]的算法节省了 117.1 ms 和 194.6 ms, 因此, 本文算法具有更好的时间性能, 可以满足无人机自主降落的实时性要求。

表 4 算法时间性能
Tab.4 Time performance of algorithm ms

方法	平均标志检测时间	最大标志检测时间	平均姿态估计时间	最大姿态估计时间	总平均运行时间
文献[4]方法	82.4	95.2			
文献[5]方法	234.3	252.4			
文献[6]方法	284.3	295.1			
PC1	117.2	125.8	287.9	292.9	405.1
PC2	89.7	97.4	217.5	251.2	307.2

4 结束语

提出了一种基于单目视觉的无人机姿态估计及自主着陆算法。利用视觉标志的几何特征, 采用标志五步提取法实现 H 形标志提取; 提出一种基于距离三点法的角点检测方法, 得到 H 形标志的 12 个角点, 并与参考图像对应角点匹配; 由单应矩阵实现姿态角的估计, 根据视觉标志质心与图像中心的位置关系及相机成像原理, 实现视觉标志的位置估计。搭建验证算法有效性和准确性的视觉实验平台, 对本文算法进行了实验验证。实验结果显示, 本文算法对视觉标志姿态角和位置估计具有较高的精度, 其相对误差分别低于 3% 和 2%。本文算法对视觉标志的平均检测时间为 89.7 ms, 姿态估计平均用时为 217.5 ms。虽然标志检测时间略高于文献[4]方法, 但相比其他文献明显缩短, 综合性能指标更优, 具有较好的实用性。

参 考 文 献

[1] 曾聪. 基于视觉反馈的微型四旋翼飞行器自主着陆系统研究及应用[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
ZENG Cong. Research and application of autonomous landing system for mini-quadrotor based on visual feedback[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 吕强, 马建业, 王国胜, 等. 基于视觉伺服的小型四旋翼无人机自主飞行控制研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(24): 68-73.
LÜ Qiang, MA Jianye, WANG Guosheng, et al. A review of achievement in small quadrotor autonomous flight control based on visual servoing[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(24): 68-73. (in Chinese)

[3] 张小正, 周鑫, 陈丽娟, 等. 无人机视觉着陆位姿参数估计方法[J]. 电光与控制, 2017(5): 26-29.
ZHANG Xiaozheng, ZHOU Xin, CHEN Lijuan, et al. Position and pose estimation of UAVs in visual landing[J]. Electronics Optics & Control, 2017(5): 26-29. (in Chinese)

[4] LEE S, JANG J W, BAEK K R. Implementation of vision-based real time helipad detection system[C] // International Conference on Control, Automation and Systems. IEEE, 2012: 191-194.

[5] OLIVEIRA C S, ANVAR A P, ANVAR A, et al. Comparison of cascade classifiers for automatic landing pad detection in digital images[R] // Simposio Brasileiro De Automacao Inteligente, 2015: 1-6.

[6] PRAKASH R O, SARAVANAN C. Autonomous robust helipad detection algorithm using computer vision[C] // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. IEEE, 2016: 2599-2604.

[7] SARIPALLI S, MONTGOMERY J F, SUKHATME G. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle[J]. Robotics & Automation IEEE Transactions on, 2003, 19(3): 371-380.

- SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(7): 38–45. (in Chinese)
- [18] 戴飞, 赵武云, 宋学锋, 等. 提土-全膜面覆土装置作业参数优化与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 88–96. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Operating parameter optimization and experiment of device with elevating and covering soil on plastic-film[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 88–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171111&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.011. (in Chinese)
- [19] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 153–159. LI Qiang, LIU Guobin, XU Mingxiang, et al. Soilanti-scouribility and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(10): 153–159. (in Chinese)
- [20] 孙伟, 刘小龙, 张华, 等. 马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 14–22. SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(20): 14–22. (in Chinese)
-

(上接第40页)

- [8] SARIPALLI S, SUKHATME G S, MONTGOMERY J F. An experimental study of the autonomous helicopter landing problem [J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2003, 5: 466–475.
- [9] SARIPALLI S, MONTGOMERY J F, SUKHATME G S, et al. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle [C]// *International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2002: 2799–2804.
- [10] SANCHEZ-LOPEZ J L, SARIPALLI S, CAMPOY P, et al. Toward visual autonomous ship board landing of a VTOL UAV[C]// *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. IEEE, 2013: 779–788.
- [11] SANCHEZ-LOPEZ J L, PESTANA J, SARIPALLI S, et al. An approach toward visual autonomous ship board landing of a VTOL UAV[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74(1–2): 113–127.
- [12] SILVA J, MENDONCA R, MARQUES F, et al. Saliency-based cooperative landing of a multirotor aerial vehicle on an autonomous surface vehicle[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. IEEE, 2014: 1523–1530.
- [13] LIN S, GARRAT M A, LAMBERT A J. Monocular vision-based real-time target recognition and tracking for autonomously landing an UAV in a cluttered shipboard environment[J]. *Auton Robot*, 2017, 41(4): 881–901.
- [14] PREMACHANDRA C, YOSHIDA T, KATO K. A basic study of landing system for multicopters using Raspberry Pi[C]// *IEEE International Symposium on Consumer Electronics*. IEEE, 2015: 1–2.
- [15] SUDEVAN V, SHUKLA A, KARKI H. Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on a stationary target [C]// *International Conference on Control, Automation and Systems*. IEEE, 2017: 362–367.
- [16] 赵腾, 野口伸, 杨亮亮, 等. 基于视觉识别的小麦收获作业线快速获取方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 32–37. ZHAO Teng, NOBORU N, YANG Liangliang, et al. Fast edge detection method for wheat field based on visual recognition[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 32–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161105&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.005. (in Chinese)
- [17] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing*[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 2008: 374–379.
- [18] BRADLEY D, ROTH G. Adaptive thresholding using the integral image[J]. *Journal of Graphics Gpu & Game Tools*, 2007, 12(2): 13–21.
- [19] 邢藏菊, 王守觉, 邓浩江, 等. 一种基于极值中值的新滤波算法[J]. *中国图象图形学报*, 2001, 6(6): 533–536. XING Cangju, WANG Shoujue, DENG Haojiang, et al. A new filtering algorithm based on extremum and median value[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, 6(6): 533–536. (in Chinese)
- [20] 赵文彬, 张艳宁. 角点检测技术综述[J]. *计算机应用研究*, 2006, 23(10): 17–19. ZHAO Wenbin, ZHANG Yanning. Survey on corner detection[J]. *Application Research of Computers*, 2006, 23(10): 17–19. (in Chinese)
- [21] 章为川, 孔祥楠, 宋文. 图像的角点检测研究综述[J]. *电子学报*, 2015, 43(11): 2315–2321. ZHANG Weichuan, KONG Xiangnan, SONG Wen. Review of image corner detection algorithms[J]. *ACTC Electronica Sinica*, 2015, 43(11): 2315–2321. (in Chinese)
- [22] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple view geometry in computer vision*[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2003: 88–93.
- [23] FAUGERAS O, LUSTMAN F. Motion and structure from motion in a piecewise planar environment[J]. *International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 1988, 2(3): 1–23.