

基于激光投射和视觉的无人机姿态角测量方法

张佳宝¹, 傅骁^{1*}, 段发阶¹, 蒋佳佳¹, 梁春疆¹, 李天宇¹, 李存军²

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

²舟山市质量技术监督检测研究院, 浙江 舟山 316000

摘要 无人机(UAV)的姿态角参数是衡量无人机飞行性能的重要参数。传统测量方法中 UAV 装置的各类传感器受 UAV 本身影响会产生较大数据误差, 现有的视觉测量方法受光线影响, 对标记点的识别精度有限, 因而提出了一种基于激光投射和视觉的 UAV 姿态角测量方法。通过全站仪数据确定标记点在世界坐标系下的三维位置, 并由搭载于 UAV 的激光发射器向前侧及左右两侧的幕布发射激光, 相机实时捕捉并解算幕布上激光点的位移信息, 通过激光点与标记点的几何关系及 Rodrigues 旋转公式求解 UAV 姿态角。实验结果表明, 所提方法的姿态角解算误差在 0.2° 以下, 可满足 UAV 姿态角度测量的精度要求。

关键词 机器视觉; 姿态测量; 特征点定位; 机器视觉; Rodrigues 旋转; 坐标转换

中图分类号 TN06

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0815007

Unmanned Aerial Vehicle Attitude Angle Measurement Method Based on Laser Projection and Vision

Zhang Jiabao¹, Fu Xiao^{1*}, Duan Fajie¹, Jiang Jiajia¹, Liang Chunjiang¹, Li Tianyu¹, Li Cunjun²

¹State Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology

Supervision, Zhoushan, Zhejiang 316000, China

Abstract The attitude angle parameter of the unmanned aerial vehicle (UAV) is crucial for determining its flight performance. In the standard measurement method, the various sensors of the UAV device generated considerable data errors due to the influence of the UAV. As the existing visual measurement methods are affected by light and have limited recognition accuracy of marking spots, a method for UAV attitude angle measurement based on laser projection and vision is proposed. The three-dimensional position of the marker point in the world coordinate system is determined via the total station data, and the laser transmitter mounted on UAV emits lasers toward the front, left, and right sides of the screen, while the camera captures and calculates the displacement of the laser point on the screen in real time. Through the geometric relationship between the laser and marking points and the Rodrigues rotation formula, the attitude angle of the UAV is determined. The experimental results indicate that the calculation error of the attitude angle of the proposed method is below 0.3° , which meets the accuracy criteria for the UAV attitude angle measurement.

Key words machine vision; attitude measurement; feature point positioning; machine vision; Rodrigues rotation; coordinate conversion

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61905175, 51775377, 61971307)、国家重点研发计划(2020YFB2010800)、霍英东基金会资助(171055)、中国博士后科学基金(2020M680878)、广东省重点研发计划(2020B0404030001)、天津市科技计划(20YDT-PJC01660)、中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题(GJCZ-2020-0040, GJCZ-2020-0041)

通信作者: *fuxiao215@tju.edu.cn

1 引言

近些年,无人机(UAV)^[1]被广泛应用于航空摄影、植保、农田检测、电力检查等领域,国内外对无人机飞行性能检测的研究成为热点,而无人机姿态角参数是衡量无人机飞行性能的一项重要指标。目前,国内并没有统一的测量标准适用于各种厂家,多种尺寸、形状、样式的民用小型无人机产品的姿态角的测量。常用的无人机姿态测量方法主要有以下几种。通过全球定位系统(GPS)和惯导数据解算姿态角,如华东师范大学成亚男^[2]利用共时钟多天线模式进行GPS姿态测量,最高精度可达到 0.3° ;Doust等^[3]提出一种利用扩展卡尔曼滤波将GPS与惯导相融合的算法,最终的角度误差在 0.4° 。然而GPS信号^[4]在室内容易丢失,惯性导航中的一些惯性元件的测量性能会随着周围环境的不断变化而变差,使测量误差^[5]逐渐累积,整体测量精度有限,可能无法适用于在室内或有遮挡的室外进行长时间不间断测量的情况。可以运用运动捕捉系统或者激光雷达进行姿态角的测量,这类方法测量精度高,但同时测量成本也会大幅度提高。利用机器视觉的方法进行无人机姿态角测量时,测量精度高、不易受到环境的干扰且成本更低,国内如南京航空航天大学杨世保等^[6-7]也取得了研究成果,任丽君等^[8]通过无人机搭载相机拍摄地面靶标解算图像信息的方法对无人机姿态角进行测量,最小的角度误差在 0.36° 。但目前国内多通过对标记点进行角点提取或利用标记点形变的方法来解算姿态角,但该方法在图像处理过程中受光强等环

境因素的影响,相机对标记点的识别精度会有所下降,导致整体测量精度受限。还有通过相机提取无人机上特征点来测量姿态角的方法,然而针对不同的无人机型,选取的特征点的位置及数量并不一致,不容易建立统一的测量流程及标准。

因此针对上述问题,本文提出了一种基于激光投影和摄影测量相结合的无人机姿态角高精度测量方法。利用无人机刚性挂载轻量级激光发射器,分别向前侧、左侧及右侧投射3束激光线到显影幕布,3组相机分别固定拍摄3侧幕布,实时获取显影幕布激光点图像;当无人机姿态角发生变化时,显影幕布上的激光点发生对应偏移,结合摄影测量系统,通过解算激光点偏移量得到无人机的姿态角,提高了姿态角的测量精度。实验结果表明,所提方法适用于多种整体长度在3 m以下的民用小型无人机的飞行姿态测量。

2 姿态角测量系统

所设计的无人机姿态角测量系统如图1所示。分别在测试平台的前侧、左侧及右侧放置3面黑色幕布并在相机视场内设置圆形十字标记点,为保证测量范围,每侧通过立架垂直放置3台相机,并保证视场有一定重合;通过全站仪测得每个标记点的空间坐标,此时所有标记点均统一在全站仪所设置的世界坐标系下,标记点的二维平面坐标由相机解算得到;在测量前,利用每个相机视场内的4个标记点的二维坐标和三维坐标,通过张正友标定法对相机进行标定,用来在测量过程中对获取到的图像的畸变进行校正;激光发射器刚性搭载于无人机上,分

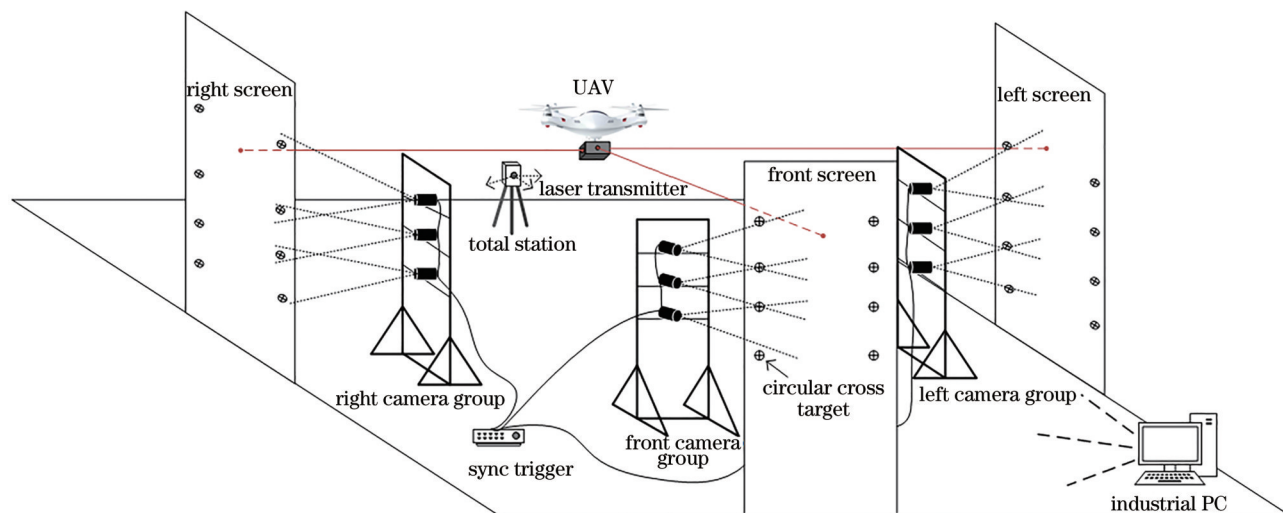


图1 姿态角测量系统总体布局

Fig. 1 Overall layout of attitude angle measurement system

别向前侧、左侧及右侧发射 3 束激光至显影幕布,相机组捕获幕布上激光点的位置图像,并实时解算出激光点的二维平面坐标,相机同时连接同一个同步触发电路,通过同步电路以一定频率硬件触发各相机组进行同步拍摄,保证了所有相机的同步摄影,避免了因摄影时间差而产生的测量误差。最后通过求解一组包含标记点空间位置信息、平面位置信息及激光点平面位置信息的三元二次方程组^[9],得到激光点的空间位置信息,此时得到的激光点空间位置坐标与标记点的位置坐标处于同一世界坐标系。最后,利用 Rodrigues 旋转公式,对激光点空间位置的改变量进行计算,最终得到每一时刻无人机姿态角。

3 基于激光视觉的姿态角测量法

3.1 图像处理算法

所用到的图像处理算法主要用于对标记点图像和激光点图像进行处理。

3.1.1 标记点图像处理

标记点采用圆形十字靶标记,如图 2 所示。标记点的空间三维坐标由全站仪测得,将每个圆形十字靶标的十字中心作为全站仪测量目标,测得该标记点的空间三维坐标。标记点的二维像素坐标是从相机拍摄到的图像中提取出来的,将标记点圆形轮廓的中心坐标视为标记点的二维图像坐标,并且由于标记点的空间位置固定不变,在最初解算出各标记点的像素坐标后即可应用到整个测量过程。

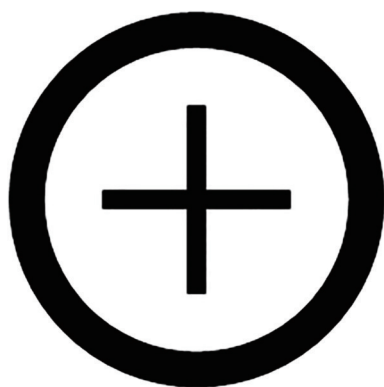


图 2 圆形十字靶标

Fig. 2 Round cross target

提取目标中心点的方法可以分为基于区域的方法和基于边缘的方法两种。本实验组对标记点中心坐标的获取采用基于边缘的方法。边缘检测

实际上是一种基于幅度不连续性进行分割的方法,本实验组利用 Canny 算子对标记点的轮廓进行边缘检测。Canny 算子给定了最优化检测边缘的 3 个指标:好的信噪比、好的边缘定位性能、对唯一边缘有唯一响应^[10],具体流程如图 3 所示。首先,对相机采集到的图像进行二值化处理,而后利用 Canny 算子进行边缘检测得到轮廓边界像素并将这些边缘像素组装成轮廓,再对组装后的轮廓边缘进行面积及长度的几何约束,筛选出有效的类椭圆标记点轮廓,最后对这些有效轮廓进行椭圆拟合,依据拟合后的轮廓得出标记点的中心坐标。

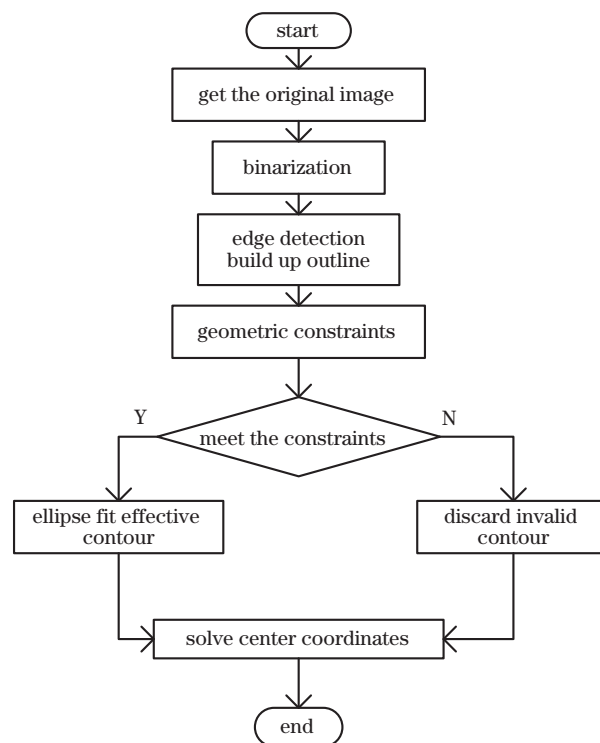


图 3 标记点轮廓处理流程

Fig. 3 Processing flow of marking point contour

3.1.2 激光点图像处理

因为无人机姿态角会不停变化且变化的时间很短,所以相机拍摄到的无人机搭载的激光发射器所投射到显影幕布上的激光点图像会出现一定程度的拖影,若仍采取上述方法解算激光点的中心坐标,容易出现无法获得有效轮廓的情况,且处理后的图像灰度值只有 0 和 1,丢失了很多灰度信息,这样找出来的中心实际上是轮廓几何图形的形心,灰度值的影响并没有反映出来。因此本实验组采用灰度重心法来求取激光点的二维像素坐标,并且在相机镜头前安装滤光片,最大程度降低自然光对激光点识别的影响,图 4 为激光点重心坐标的求解过

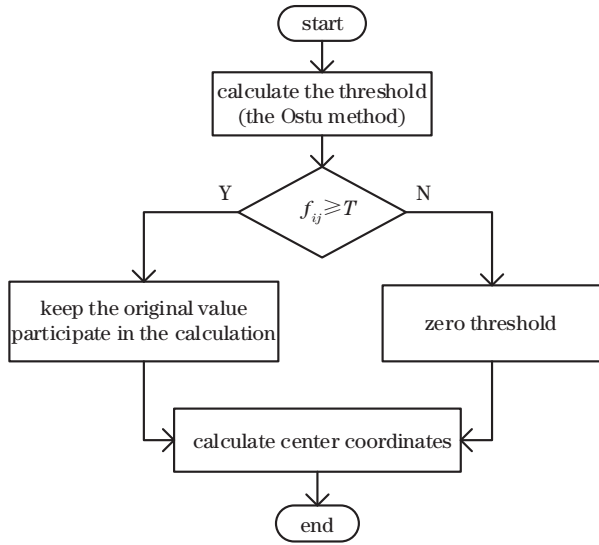


图 4 激光点重心坐标计算流程

Fig. 4 Calculation process of center of gravity coordinates of laser point

程。对于一幅 $M \times N$ 大小的图像, 首先利用灰度图像自动阈值分割法 (Otsu)^[11] 处理实时拍摄的图像, 得到该幅图像的阈值 T , 然后筛选出符合条件的像素点, 像素的灰度值超过阈值 T 的均参与重心处理。

$$f_{ij} = \begin{cases} 0, & f_{ij} < T \\ f_{ij}, & f_{ij} \geq T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: f_{ij} 为图像坐标 (x_i, y_j) 处的像素灰度值。

则激光点的中心坐标的表达式为

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_i f_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}}, \quad (2)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_j f_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}}, \quad (3)$$

式中: x_0 为激光点重心横坐标; y_0 为激光点重心纵坐标。

灰度重心法的优点在于其对噪声不敏感、计算量小、提取重心速度快, 且对于亮度不均匀的目标, 灰度重心法可按目标光强分布求出光强权重质心坐标。使用重心法提取的二维图像坐标精度较高,

且处理速度较快。

3.2 姿态角解算方法

标记点及激光点的平面坐标所处的像素平面坐标系是指各相机所拍摄到的图片所在的坐标系, 以图片左上角的像素点为坐标原点, 分别以图片中相互垂直的长和宽两个方向作为 X 轴和 Y 轴, 以 pixel 作为单位; 将标记点的空间坐标所处的坐标系定义为所提系统的世界坐标系, 即通过全站仪建站, 以全站仪所在地为坐标系原点的空间坐标系, 所提系统的世界坐标系以 m 为单位。当标记点的平面、空间坐标信息及激光点的平面坐标信息均已知后, 即可解算出无人机的姿态角, 此时无人机的姿态角也统一在该世界坐标系下。

图 5 为特征点分布图, O 点为激光点, 其平面坐标已知, $P_1 \sim P_4$ 分别为激光点所在相机视场内出现的 4 个圆形十字标记点, 标记点的空间及平面坐标均已知。当幕布与相机基本平行时, 相机获取到的图像畸变可以忽略不计, 因此利用比例关系即可实现两点间距离从像素平面坐标系到世界坐标系的转换。最后, 利用同一时刻, 激光点到标记点的距离不变就可以得到与激光点有关的一组三元二次方程组。

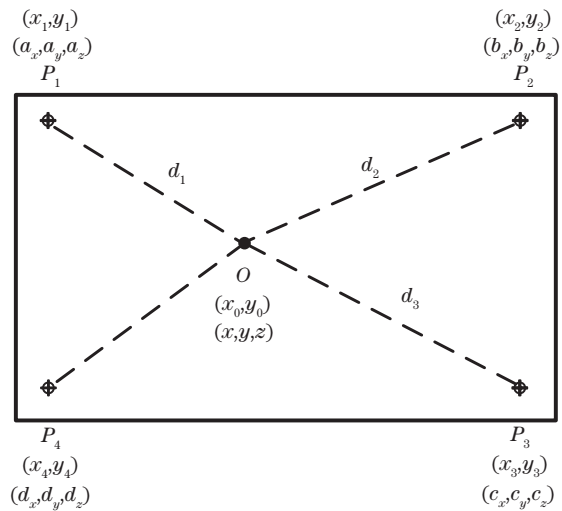


图 5 特征点分布图

Fig. 5 Distribution map of feature points

$$\begin{cases} (x - a_x)^2 + (y - a_y)^2 + (z - a_z)^2 = k_1 [(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2] \\ (x - b_x)^2 + (y - b_y)^2 + (z - b_z)^2 = k_2 [(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2], \\ (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = k_3 [(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2] \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ k_2 = \frac{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ k_3 = \frac{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： (a_x, a_y, a_z) 为点 P_1 空间坐标； (x_1, y_1) 为点 P_1 平面坐标； $P_2 \sim P_3$ 同理； (x_0, y_0) 为激光点的二维像素坐标； $k_1 \sim k_3$ 为图像内求得的激光点到各标记点的距离与点 P_1 和点 P_2 在幕布上实际距离的比例。

当激光点三维空间坐标已知，通过激光点三维空间坐标的改变情况，即可解算出无人机姿态角的实时变化情况，具体原理如图 6 所示。无人机可简化为两条正交的线段 AC 和 BD ， A, C, D 分别表示无人机在 3 个方向上的激光点，其具体三维空间坐标值已知。通过向量对每一时刻与初始时刻的位置关系进行比较，分别得出无人机每一时刻的横转

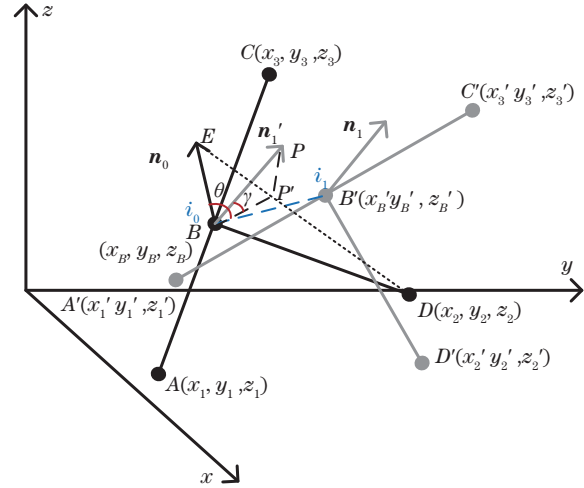


图 6 姿态角解算原理图

角、俯仰角及偏航角。

以初始时刻的 BD 方向建立 i ， BC 方向建立 j ，将某一时刻的测量法向量沿 i, j 进行分解。以 i_0 时刻和 i_1 时刻为例， i_0 时刻和 i_1 时刻的测量法向量 n_0 和 n_1 分别为

$$\mathbf{n}_0 = \overrightarrow{CA} \times \overrightarrow{CD} = \begin{bmatrix} (y_1 - y_3)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_3) \\ (z_1 - z_3)(x_2 - x_3) - (z_2 - z_3)(x_1 - x_3) \\ (x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_1 = \overrightarrow{C'A'} \times \overrightarrow{C'D'} = \begin{bmatrix} (y'_1 - y'_3)(z'_2 - z'_3) - (y'_2 - y'_3)(z'_1 - z'_3) \\ (z'_1 - z'_3)(x'_2 - x'_3) - (z'_2 - z'_3)(x'_1 - x'_3) \\ (x'_1 - x'_3)(y'_2 - y'_3) - (x'_2 - x'_3)(y'_1 - y'_3) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

而后通过点 B, C, P 的坐标，可求出点 P' 的坐标。

$$\begin{cases} x_{P'} = (x_3 - x_B)t_{P'} + x_P \\ y_{P'} = (y_3 - y_B)t_{P'} + y_P \\ z_{P'} = (z_3 - z_B)t_{P'} + z_P \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{P'} = \frac{(x_3 - x_B)(x_B - x_P) + (y_3 - y_B)(y_B - y_P) + (z_3 - z_B)(z_B - z_P)}{(x_3 - x_B)^2 + (y_3 - y_B)^2 + (z_3 - z_B)^2}. \quad (9)$$

有

$$\overrightarrow{BP'} = (x_{P'} - x_B, y_{P'} - y_B, z_{P'} - z_B). \quad (10)$$

横转角 γ 为 \mathbf{n}_1 和 $\overrightarrow{BP'}$ 的夹角，俯仰角 θ 为 \mathbf{n}_0 和 $\overrightarrow{BP'}$ 的夹角，具体表达式为

$$\cos \langle \mathbf{n}_1, \overrightarrow{BP'} \rangle = \frac{a'(x_{P'} - x_B) + b'(y_{P'} - y_B) + c'(z_{P'} - z_B)}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2} \sqrt{(x_{P'} - x_B)^2 + (y_{P'} - y_B)^2 + (z_{P'} - z_B)^2}}, \quad (11)$$

$$\gamma = \arccos \langle \mathbf{n}_1, \overrightarrow{BP'} \rangle, \quad (12)$$

$$\cos \langle \mathbf{n}_0, \overrightarrow{BP'} \rangle = \frac{a(x_{P'} - x_B) + b(y_{P'} - y_B) + c(z_{P'} - z_B)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{(x_{P'} - x_B)^2 + (y_{P'} - y_B)^2 + (z_{P'} - z_B)^2}}, \quad (13)$$

$$\theta = \arccos \langle \mathbf{n}_0, \overrightarrow{BP'} \rangle. \quad (14)$$

此时,由 i_1 时刻位置按原路径分别旋转相同的横转角及俯仰角角度,即 $\overrightarrow{B'D'}$ 绕 $\overrightarrow{A'C'}$ 按右手定则旋转 θ , $\overrightarrow{C'A'}$ 绕 $\overrightarrow{D'B'}$ 按右手定则旋转 γ , 即可得到新的点 A'' 、 B'' 、 C'' 、 D'' 。此时只有偏航角的差别,再运用 Rodrigues 旋转公式,有

$$\overrightarrow{B'D''} = \cos \theta \overrightarrow{B'D'} + (1 - \cos \theta) (\overrightarrow{B'D'} \cdot \mathbf{u}_{\overrightarrow{A'C'}}) \mathbf{u}_{\overrightarrow{A'C'}} + \sin \theta \mathbf{u}_{\overrightarrow{A'C'}} \times \overrightarrow{B'D'}, \quad (15)$$

$$\overrightarrow{C''A''} = \cos \gamma \overrightarrow{C'A'} + (1 - \cos \gamma) (\overrightarrow{C'A'} \cdot \mathbf{u}_{\overrightarrow{B'D'}}) \mathbf{u}_{\overrightarrow{B'D'}} + \sin \gamma \mathbf{u}_{\overrightarrow{B'D'}} \times \overrightarrow{C'A'}, \quad (16)$$

式中: $\mathbf{u}_{\overrightarrow{A'C'}}$ 和 $\mathbf{u}_{\overrightarrow{B'D'}}$ 为向量 $\overrightarrow{A'C'}$ 和 $\overrightarrow{B'D'}$ 的单位向量。

此时,偏航角 ψ 为 \overrightarrow{CA} 和 $\overrightarrow{C''A''}$ 的夹角,即

$$\psi = \arccos \langle \overrightarrow{CA}, \overrightarrow{C''A''} \rangle. \quad (17)$$

该姿态角解算算法利用坐标转换将 3 个激光点的二维平面坐标转换为三维空间坐标,从而将各激光点均统一在了由全站仪建立的、以建站点为坐标原点的坐标系下。这样,每个激光点由于图像处理产生的像素误差将会统一为同一世界坐标系

下的实际距离误差,此时再利用激光点的三维坐标变化解算出的姿态角的精度统一。而且激光点产生的像素误差一般在 1~2 个像素,转换为实际空间距离后误差保持在 0.01 m 以下,不会对姿态角的计算产生较大的影响。

4 实验结果与分析

在室内开辟一片 5 m × 8 m 的空地,测试平台位于空地中间偏后侧位置,在测试平台的前侧、左侧及右侧设立贴有白色圆形十字标记点的黑色幕布,黑色幕布为亚克力覆膜材质,不易产生形变,幕布尺寸为 2 m × 1.5 m;所用激光中心波长为 650 nm;所用相机为 Basler 公司的 pylon 系列工业相机,分辨率为 1280 pixel × 960 pixel;在所有镜头前增添中心波长为 650 nm、带宽为 30 nm 的红色滤光片,最大程度降低自然光的影响,场地整体布局如图 7 所示。每侧幕布的图像由垂直排列的 3 台工业相机同时获取,保证 15% 的视场重合且所有标记点均出现在视场内,幕布与相机的具体布局如图 8 所示。

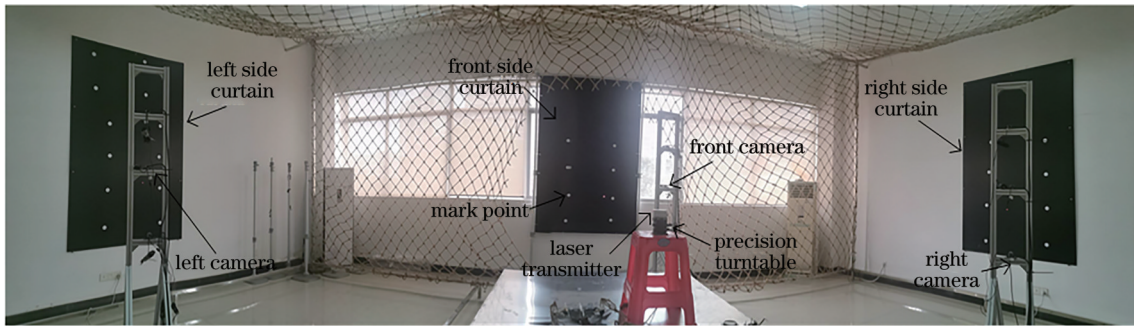


图 7 测量场地整体布局

Fig. 7 Overall layout of measurement site

实验中,为了具体判断所提方法的测量精度,采用三轴精密转台搭载激光发射器对该方法进行精度验证。本实验采用的三轴精密转台型号是联英精机精密型手动角位台 SJ110-15,该转台可以实现 $\pm 15^\circ$ 横转角、俯仰角、偏航角的转动,最小刻度为 1° ,最小读数为 $6'$,其精度远远高于所提系统的测量精度,可以作为标准姿态角对所提系统姿态角的测量值进行精度对比。将激光发射器安装在精密转台上,控制转台,分别改变其横转、俯仰及偏航角

度,将解算结果与精密转台实际改变角度对比,以测量姿态解算的误差。

在经过多组测试后,对各组测量数据利用加权平均法进行了处理,横转角、俯仰角、偏航角测量误差如图 9 所示。横转角在 $0^\circ \sim 12^\circ$ 的测量范围内,误差基本保持在 0.2° 以下;俯仰角在 $0^\circ \sim 12^\circ$ 的测量范围内,误差维持在 0.2° 左右;偏航角在 $0^\circ \sim 9^\circ$ 的测量范围内,误差均低于 0.1° 。因而,所提方法可以满足目前对无人机姿态角测量精度的要求。

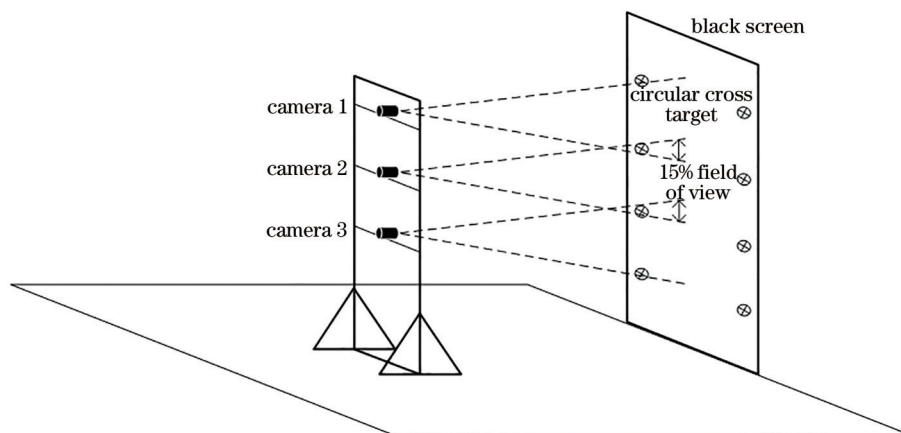


图 8 幕布及相机布局图

Fig. 8 Screen and camera layout

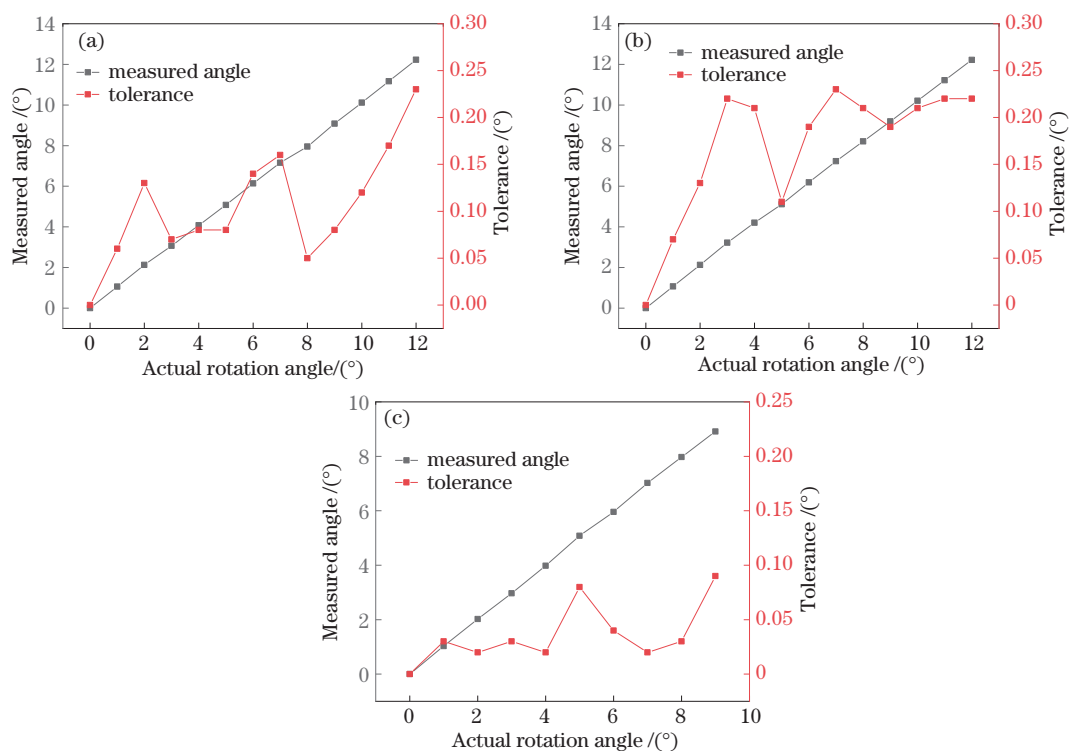


图 9 姿态角测量误差。(a)横转角;(b)俯仰角;(c)偏航角

Fig. 9 Tolerance of attitude angle. (a) Roll angle; (b) pitch angle; (c) yaw angle

经过分析,所提算法误差主要来自 3 个方面。1)硬件方面,幕布会产生微小形变、全站仪在测量标记点三维坐标时也会因仪器本身测量精度的问题产生一定误差;2)在对标记点及激光点进行图像处理获得平面坐标时,所提算法也会产生 1~2 个像素的误差;3)目前采取的相机标定方法虽然可以实现快速标定,但对镜头畸变的消除能力较差,也会产生相应的误差。

最后,在无人机上进行了实测,对小型四旋翼无人机进行了测量。首先,激光器刚性挂载在无人

机上,确保两者相对位置保持不变,而后利用水平仪对该无人机陀螺仪进行了校准,以此刻的位置作为绝对位置,整个测量过程的姿态角变换均根据与该绝对位置的变化进行测量。并同时对比了无人机自测姿态角数据和所提系统的姿态角测量数据,测量数据如表 1 所示,测量现场如图 10 所示。

2015 年发布的《中国无人机通用技术标准》中规定,无人机产品的合格标准为俯仰角及偏航角测量误差在 3.5°以内,偏航角测量误差在 3°以内。由表 1 可知,该无人机姿态角的横转角、俯仰角、偏航

表 1 无人机姿态角实测数据

Table 1 Measured data of UAV attitude angle

Maximum attitude angle	Roll angle / (°)	Pitch angle / (°)	Yaw angle / (°)
Measurement data of proposed system	4.222	1.261	0.998
UAV self-test data	3.050	1.207	0.989

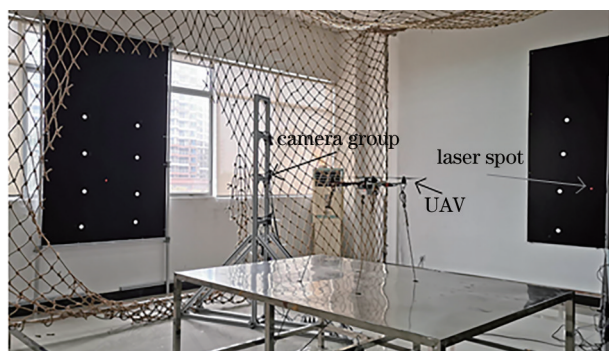


图 10 无人机姿态角实测图

Fig. 10 Measured diagram of UAV attitude angle

角测量误差分别为 1.172° 、 0.054° 、 0.009° ，符合规定的产品合格标准。实验结果说明，所提系统可以对无人机产品的飞行姿态性能进行有效的评判。

5 结 论

提出了一种基于激光投影和摄影测量相结合的无人机姿态角高精度测量方法，所提方法通过测量激光点的位移对无人机姿态角的变化进行实时解算。首先，利用全站仪对标记点进行三维标定，并结合摄影测量，通过边缘算法及灰度重心法获得标记点和激光点的二维像素坐标；然后运用 Rodrigues 旋转公式求解出每一时刻无人机姿态角的变化量。实验结果表明，所提方法的运行速度较高，姿态角解算误差均在 0.2° 以下，可以满足无人机姿态角测量精度的要求。

参 考 文 献

[1] Duan H B, Shen Y K, Zhao Y J, et al. Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2019[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(1): 170-187.
段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2019年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 170-187.

[2] Cheng Y N. Key technologies of GPS/BDS attitude measurement based on dual-antenna receiver with common clock[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
成亚男. 基于时钟同步一机双天线接收机的 GPS/

BDS 姿态测量关键技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.

[3] Doust M D, Fakharian A. Reducing the navigational error of a flying object in space by using an integration of GPS and INS data[C]//2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCA), January 27-28, 2016, Qazvin, Iran. New York: IEEE Press, 2016: 245-250.

[4] Ruan L F, Wang G, Sheng H Y. 3D position and attitude measurement based on marking-points recognition[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(11): 2856-2858, 2862.
阮利锋, 王赓, 盛焕焯. 基于标志点识别的三维位姿测量方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(11): 2856-2858, 2862.

[5] Wu J W, Zeng Q M, Nie L J. Estimation of the INS's errors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(6): 2-6.
吴俊伟, 曾启明, 聂莉娟. 惯性导航系统的误差估计[J]. 中国惯性技术学报, 2002, 10(6): 2-6.

[6] Yang S B. Research on position and attitude estimation for UAV landing based on vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
杨世保. 无人机着陆位姿参数视觉估计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[7] Ren Q Y. Vision-based landmark detection, position and orientation estimation for mini unmanned helicopter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
任沁源. 基于视觉信息的微小型无人直升机地标识别与位姿估计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[8] Ren L J. Research on UAV attitude angle measurement system based on airborne single camera [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
任丽君. 基于机载单相机的无人机姿态角测量系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.

[9] Zhang Z K, Zhang L W. On the calculation of shield head and tail center coordinates of shield machine using three-dimensional quadratic equations[J]. Engineering Technology (Citation Edition), 2016(12): 208-209.
张志坤, 张立伟. 关于利用三元二次方程组求盾构机

- 盾首和盾尾中心坐标的计算[J]. 工程技术(引文版), 2016(12): 208-209.
- [10] Liu J, Zhang C. The extraction of circular markers based on OpenCV[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(5): 27-29.
刘江, 张岑. 基于 OpenCV 的圆形标记点的提取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(5): 27-29.
- [11] Liu J Z, Li W Q. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method[J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101-105.
刘健庄, 栗文青. 灰度图象的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105.