

基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导技术研究

张磊 杨甬英 张铁林 江佳斌 刘东

浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 针对无人机(UAV)着陆时机身相对于着陆点的精确位姿参数的需求,设计了一套基于日盲区紫外成像的无人机自主着陆引导系统。利用日盲区紫外成像技术对典型特征的紫外信标点进行成像,基于摄像机透视投影变换以及直接线性变换求得位姿参数初值,并对初值进行非线性优化得到精确解,由此实现无人机自主着陆引导工作。利用日盲区紫外在近地面唯一性的特性,能消除自然背景光的影响,在低能见度条件下的优势尤其明显。经实验验证,系统距离定位相对精度能够达到 0.5%,角度定位绝对精度优于 1°,能够满足无人机着陆引导的精度要求。

关键词 机器视觉; 无人机着陆引导系统; 位姿测量; 日盲区紫外; 单目视觉

中图分类号 TN23; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0704001

Research of UAV Landing Guidance Technology Based on Solar-Blind Ultraviolet Imaging

Zhang Lei Yang Yongying Zhang Tielin Jiang Jiabin Liu Dong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract An unmanned aerial vehicle(UAV) landing guidance system based on solar-blind ultraviolet imaging is designed to meet the demand of precise pose parameters of fuselage to the landing sites. The system utilizes a solar-blind UV imaging system with dual channel and a UV beacon consisted of several sources, which is imaged by the ultraviolet-channel imaging system, and the spot position of UV beacon is extracted based on light intensity. Camera perspective projection model and direct linear transformation algorithm are adopted to solve the initial pose parameters. The accurate pose parameters of UAV to the UV beacon are obtained by the iterative optimization, which guides UV safely landing. Because of the uniqueness of solar-blind ultraviolet near the ground, the advantages of system in poor visibility conditions are particularly obvious. Experimental results show that the relative accuracy of range location can reach 0.5% and the absolute accuracy of angle location is better than 1°. The proposed system can meet the requirements of UAV landing guidance.

Key words machine vision; unmanned aerial vehicle landing guidance system; pose measurement; solar-blind UV; monocular vision

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 150.5670

1 引言

无人机是一种具有动力、由无线电遥控操作或靠自备程序控制自主飞行的可携带多任务设备、执行多种任务的无人驾驶飞行器(UAV),其中无人直升机(UH)又具有垂直升降、空中悬停、低空贴地飞行等特点。在民用和军用领域都有极大的研究价值、不可估量的应用潜力以及不可替代的战略地位。

收稿日期: 2015-12-23; **收到修改稿日期:** 2016-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(11275172,61475141)、浙江大学现代光学仪器国家重点实验室资助项目(MOI2015B06)

作者简介: 张磊(1992—),男,硕士研究生,主要从事日盲区紫外成像、机器视觉方面的研究。

E-mail: njstzhangl@163.com

导师简介: 杨甬英(1954—),女,博士,教授,主要从事精密测试与计量技术、光电信息传感与纳米技术、双光谱紫外成像检测等方面的研究。E-mail: chuyyy@zju.edu.cn(通信联系人)

近些年,着陆引导工作始终是无人机研究的重点之一。常见的方法有全球定位系统(GPS)导航、惯性导航技术(INS)以及基于机器视觉的导航技术等。由于GPS代价昂贵,战时不可用,在局部地域内受地形条件影响较大,且易受电磁干扰;INS的误差随着时间的推移而不断加大,累计误差较大。所以上述两类方法都难以满足无人机在着陆引导时的精度要求。20世纪90年代以来,美国卡内基·梅隆大学、南加州大学^[1]以及清华大学等高校进行了基于机器视觉的无人机定位算法的研究,并发掘了机器视觉在无人机着陆引导方面的巨大应用^[2]。但基于机器视觉的无人机定位算法也存在局限性,因为目前机器视觉定位一般基于可见光成像,成像过程受气候条件、环境照度、自然光背景等条件影响较大,信标图案的识别以及特征信息提取算法复杂、稳健性差,严重影响定位算法的稳定性。另外,受制于成像系统的分辨率有限,系统的定位距离被大幅限制,而高分辨率则带来巨大的运算量,导致实时性不足。因此,为了突破可见光成像的局限性,并消除自然光的干扰,将成像光谱范围向红外波段进行延伸^[3-4]。但红外光穿透能力较差、自然界热源较多,仍受背景噪声干扰;同时,非制冷型红外成像器件的成像质量低,制冷型红外成像器件体积大、质量重,难以应用在无人机上。基于此,基于机器视觉的无人机着陆引导方法仍有亟待解决的难题。

太阳辐射谱段中范围在240~280 nm的紫外波段被叫做日盲区紫外,由于大气平流层的臭氧层对250 nm波长附近的紫外线具有强烈的吸收作用,且臭氧层以下的大气成分的散射作用以及地表臭氧也对该波段的光信号具有吸收作用,所以到达海平面附近的日盲区紫外辐射几乎衰减至零,则基于日盲区紫外成像的应用可以最大程度规避来自太阳光谱的背景干扰,消除自然背景光,图像处理工作相对减少,系统稳定性和可靠性大幅提高。紫外成像技术,通过使用特定的紫外光源,利用日盲区紫外在近地面的唯一性特性,使用高灵敏度的紫外成像系统,具有一定的破雾能力,在低能见度环境下仍具有应用前景,目前已经应用于电力设施的电晕检测、紫外通信、紫外告警等方面^[5-8]。

本文提出基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导方法。结合日盲区紫外成像技术和机器视觉定位技术,设计具有典型特征的紫外信标并置于着陆平台上;组建无人机机载紫外成像系统对信标进行识别和特征提取;基于单目摄像机透视投影模型和直接线性变换建立无人机相对位姿求解模型;利用奇异值分解获得位姿参数的最小二乘解,并通过重投影误差最小化对位姿参数进行非线性优化;搭建了无人机着陆引导系统的实验平台,验证了该模型的正确性以及算法的精确性。

2 着陆引导系统设计

基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导系统主要包含光电吊舱、主型紫外信标,图1为引导系统工作示意图。光电吊舱包括日盲区双通道紫外成像系统和数据处理系统;主型紫外信标光源发出紫外光,穿过低能见度大气环境后被紫外成像系统接收到。数据处理系统实时完成信标点的识别及其特征提取,根据信标点及其像点之间的坐标映射关系,建立相对位姿求解模型,求解无人机相对于信标的位姿,即三维距离和俯仰角、偏航角以及滚转角信息,实时的位姿参数可自主引导无人机至信标指定位置。

基于机器视觉的定位算法主要利用摄像机透视投影模型中信标点与其像点的坐标映射关系建立相对位

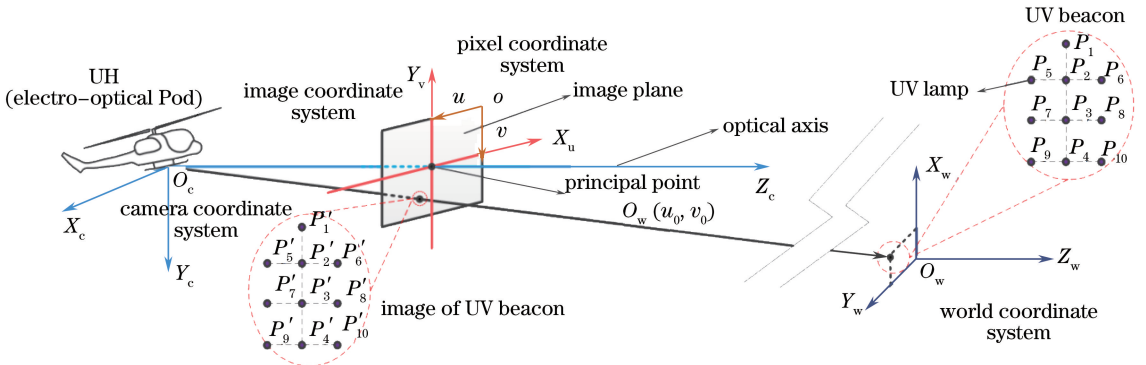


图1 系统工作示意图以及相关坐标系

Fig. 1 System schematic diagram and relevant coordinate systems

姿求解模型^[9-10],如图 1 所示。透视投影模型中涉及到的坐标系包括:世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系。所有坐标系均遵从右手法则。

1) 世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为系统自身所定义,所有物体以及坐标系统均位于该坐标系中;

2) 相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的原点位于光学系统光学中心, Z_c 轴沿光轴方向, X_c 轴、 Y_c 轴方向分别平行于 CCD 靶面的水平和垂直方向,描述以相机为参照物的信标点的空间位置;

3) 图像坐标系 $O_u X_u Y_u$ 为位于像面上的二维坐标系,原点 O_u 位于像面主点位置, X_u 轴、 Y_u 轴方向分别平行于 CCD 靶面的水平和垂直方向,描述信标点像点在像面上的位置,单位为长度单位;

4) 像素坐标系 ouv 也位于像面上,原点 o 位于图像左上角, u 沿水平方向, v 沿垂直方向,描述信标点像点的平面位置,单位为 pixel。

通过摄像机透视投影变换,寻找信标点及其像点在世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系以及像素坐标系之间的坐标转换关系,建立相对位姿求解模型。

该着陆引导系统中最重要的是日盲区双通道紫外成像系统,如图 2 所示。双通道分别为可见光通道和日盲区紫外通道,可见光通道用于无人机航拍以及着陆过程的记录;日盲区紫外通道用于对紫外信标的识别以及成像,对信标点(控制点)进行特征提取。成像器件为紫外增强型 CCD(ICCD),配合窄带滤光片^[11],将紫外通道工作谱段限制在日盲区紫外波段,消除自然背景光的干扰。可见光通道与紫外通道为准共光路设计,将可见光通道和紫外通道的视频图像进行融合叠加,即可得到同时包含着陆信标及其周边环境的图像^[12]。数据处理系统负责对双通道的视频数据进行处理,包括图像处理、位姿信息求解、数据发送及视频存储等。其中图像处理包括信标点特征提取和图像融合。

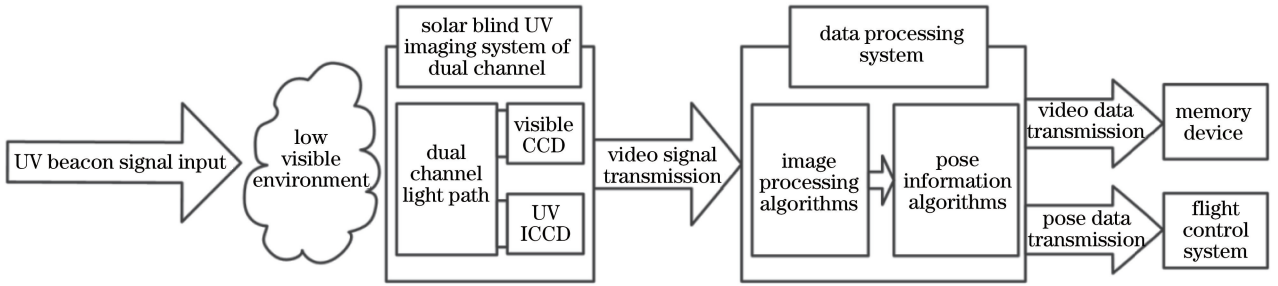


图 2 系统工作流程图

Fig. 2 Working flow chart of the system

利用日盲区紫外在近地面的唯一性特性,图 1 中的主型紫外信标由 10 组独立的低压汞灯光源组成,低压汞灯的光谱曲线如图 3 所示。

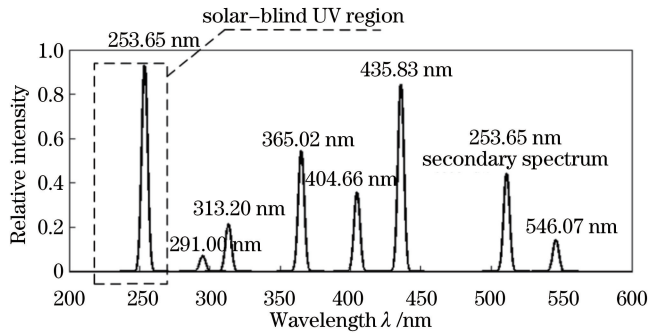


图 3 低压汞灯光谱能量分布曲线图

Fig. 3 Spectral energy distribution of low pressure mercury lamp

图 3 以 253.65 nm 为中心的虚线框所在波段范围即为有效工作波段,日盲区紫外成像系统仅对此波段的紫外信标点进行成像,能够完全消除自然背景光的干扰。

3 相对位姿参数解算

利于日盲区紫外成像直接对紫外信标点进行探测,直接得到信标点的位置,省去提取复杂图案的特征。基于透视 N 点(PNP)问题模型对控制点及其像点的坐标进行解算得到位姿关系^[13-14],其以相对简单的模型、比较固定的求解算法、快速的求解过程以及较高的精度,非常适用于无人机着陆引导等定位距离较远的场合^[3]。以球形紫外光源表示控制点的位置,基于灰度重心法提取光源的位置信息,从而确定控制点像点的坐标。最终将控制点及其像点的坐标代入求解模型,得到无人机相对于控制点的位姿参数。

3.1 控制点的识别与提取

基于 PNP 算法需要,以及紫外光源在像面上形成灰度均匀的光斑的成像特点,设计如图 1 所示的主型紫外信标,其由 10 组紫外光源组成,每组光源代表一个控制点, P' 为控制点 P 所成的像。利用灰度重心法提取紫外光斑的精确位置,定位精度一般能达到 $0.2\sim 0.5$ pixel^[15]。设光斑区域 S 内像素点 (i, j) 的灰度值为 $F(i, j)$, (u_n, v_n) 为像点 P' 在像素坐标系中提取到的坐标,即光斑中心坐标,可表示为

$$\begin{cases} u_n = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i \times F(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} F(i, j)} \\ v_n = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j \times F(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} F(i, j)} \end{cases} \quad (1)$$

控制点像素坐标提取以及位置确定的算法流程为

- 1) 通过阈值分割,滤除光子噪声、暗噪声等噪声,确定感兴趣的光斑区域 S ;
- 2) 利用灰度重心法得到控制点像点 $P'_n (n = 1, 2, \dots, 10)$ 的像素坐标 (u_n, v_n) , 下标 n 为控制点标号;
- 3) 通过最小二乘法曲线拟合得到 $P'_1 P'_2 P'_3 P'_4$ 直线,记为 L ,并确定控制点像点 P'_1 ;
- 4) 分别计算 $P'_2 \sim P'_{10}$ 到控制点像点 P'_1 的距离和到直线 L 的距离,确定 $P'_2 \sim P'_4$;
- 5) 分别计算 $P'_5 \sim P'_{10}$ 到控制点像点 P'_1 的距离,以及控制点位于直线 L 的左侧或者右侧,由此确定控制点 $P'_5 \sim P'_{10}$ 。

通过灰度重心法对主型紫外信标的 10 组控制点的像点进行坐标提取,定位精度达到 $0.2\sim 0.5$ pixel^[15]。

3.2 相对位姿求解模型

PNP 问题求解的关键是确定控制点的个数 N 和精确提取控制点像点的坐标。 $N \geq 6$ 时,其转换为直接线性变换问题(DLT),通过进行线性求解,算法复杂度减小、精度和稳健性提高^[16],但仍然欠缺。综合考虑算法求解的精度、定位的有效距离以及信标的大小,设定 $N = 10$,以 DLT 模型为基础^[10],增加控制点的个数提高算法精度和稳健性,利用奇异值分解求解线性方程组得到位姿参数初值的最小二乘解,然后通过重投影误差最小化方法对位姿参数初值非线性优化,得到精确解^[17-18]。

3.2.1 透视投影模型

摄像机透视投影模型如图 4 所示,控制点 P 在世界坐标系和相机坐标系下坐标分别表示为 (X_w, Y_w, Z_w) 和 (X_c, Y_c, Z_c) ,控制点 P 在像面上的像点为 P' ,其在图像坐标系和像素坐标系下坐标分别表示为 (X_u, Y_v) 和 (u, v) 。

根据 DLT 模型^[10],分别得到 P 和 P' 的在世界坐标系和像素坐标系下的直接变换关系

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 为摄像机内参数矩阵,可通过摄像机标定得到^[19], $\mathbf{R} = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ 为旋转矩阵, $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ 为位移矩阵,旋转矩阵和位移矩阵隐含了相机相对于控制点的位姿信息,假设相机的位姿

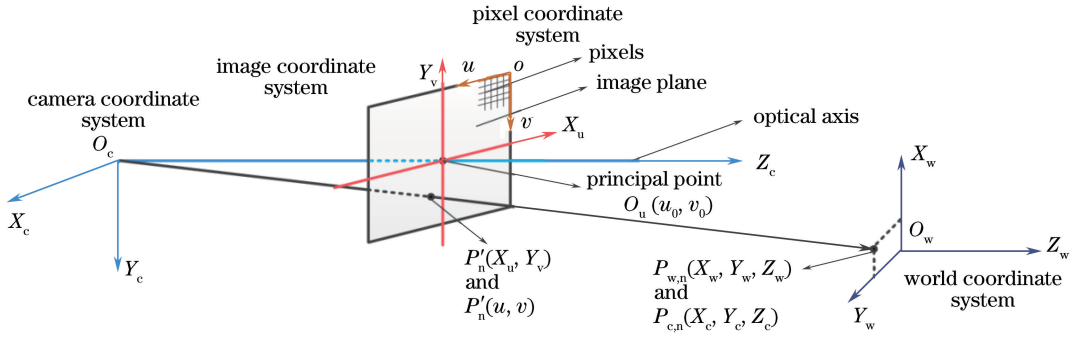


图 4 摄像机透视投影模型示意图

Fig. 4 Sketch diagram of camera perspective projection model

为无人机的位姿,即先不考虑相机与无人机的相对位姿^[18]。

由于控制点均位于 $X_w O_w Y_w$ 平面,则 $Z_w = 0$, 故(2)式可化简为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3)式可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

设 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{T} \end{bmatrix}$ 为单应矩阵^[20],在透视投影模型中存在唯一的一个单应矩阵将坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 转换为 (u, v) , \mathbf{H} 由摄像机内参矩阵 \mathbf{A} 和摄像机外参矩阵 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 两部分组成。(4)式即为基于摄像机透视投影变换得到的控制点与其像点之间直接坐标变换关系,为后续进行位姿参数的线性求解奠定基础。

3.2.2 线性求解

\mathbf{H} 包含了相机相对于控制点的位姿信息,通过求解 \mathbf{H} 可求解位姿参数。根据 DLT 模型,当系统采用 N 个控制点时,(4)式可以得到由 $2N$ 个方程组成的齐次线性方程组,即

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wi} & Y_{wi} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_{wi} & -u_i Y_{wi} & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & X_{wi} & Y_{wi} & 1 & -v_i X_{wi} & -v_i Y_{wi} & -v_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wn} & Y_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = 0, \quad (5)$$

记为 $\mathbf{LH}' = 0$, \mathbf{L} 为系数矩阵, \mathbf{H}' 的元素与待求解的 \mathbf{H} 元素相同。

(5)式是基于 DLT 得到的齐次线性方程组,当 $N \geq 6$ 时,方程的个数大于未知数个数,方程只有理论上的唯一零解。采用奇异值分解(SVD)得到方程组的最小二乘解 $\tilde{\mathbf{H}}$ ^[17]。

对比(3)式和(4)式可以发现

$$\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{T} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{A} 通过摄像机标定确定,通过 $\tilde{\mathbf{H}}$ 可以确定摄像机外参矩阵,即位姿参数

$$\begin{cases} r_1 = \gamma \mathbf{A}^{-1} h_1 \\ r_2 = \gamma \mathbf{A}^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ \mathbf{T} = \gamma \mathbf{A}^{-1} h_3 \end{cases}, \quad (7)$$

由于旋转矩阵各分量具有单位正交性,故 $\gamma = 1/\|\mathbf{A}^{-1}h_1\| = 1/\|\mathbf{A}^{-1}h_2\|$ 。

由仿射变换基本原理可知,旋转矩阵可以通过 3 个姿态角(即俯仰角 ψ 、滚转角 φ 、偏航角 θ)来表示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \cos \psi + \cos \theta \sin \psi \sin \varphi & \sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi \\ \sin \psi & -\cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

则位姿参数的三个姿态角可以表示为

$$\begin{cases} \cos \psi = (r_{11}^2 + r_{12}^2)^{1/2} \\ \psi = \arctan2(r_{13}, \cos \psi) \\ \varphi = \arctan2(-r_{23}/\cos \psi, r_{33}/\cos \psi)^\circ \\ \theta = \arctan2(-r_{12}/\cos \psi, r_{11}/\cos \psi) \end{cases} \quad (9)$$

通过奇异值分解得到最小二乘解 $\tilde{\mathbf{H}}$, 基于仿射变换解得位姿参数初值。但线性求解得到的结果精度以及稳定性较差,为了进一步提高精度,对位姿参数初值进行非线性优化。

3.2.3 非线性优化

由于 DLT 没有考虑镜头畸变等非线性因素,也没有考虑控制点像点坐标的提取误差,所以采用重投影误差最小化方法对位姿参数初值进行非线性优化^[19]。优化的对象是 6 个位姿参数: ψ 、 θ 和 φ 以及位移矩阵分量 T_x 、 T_y 、 T_z , 保证旋转矩阵 \mathbf{R} 各分量满足单位正交的特性。

以平面单应矩阵的计算为例,如图 5 (a)所示,假设两幅图像中的对应点满足 $x' = \mathbf{H}x$ 的映射关系,其中 \mathbf{H} 为单应矩阵, x 和 x' 分别为图像中的对应点,则重投影误差为

$$\epsilon = d^2(x, \hat{x}) + d'^2(x', \hat{x}'), \quad (10)$$

式中 \hat{x} 和 \hat{x}' 分别为 x 和 x' 的估计值, d 和 d' 分别为估计值与真实值之间的距离, \hat{H} 为估计值,满足 $\hat{x}' = \hat{H}\hat{x}$ 。重投影误差最小化就是通过优化 \hat{H} 和 \hat{x} ,使得 \hat{x} 和 \hat{x}' 与 x 和 x' 之间的距离最小,此时 \hat{H} 最接近真实值的 H 。对于基于机器视觉的定位算法, x 表征控制点位置,此位置是经过严格测量并精确标定,只有控制点像点的位置提取测量误差,才认为 x 为精确值, x' 存在测量误差。在此强约束情况下, $x = \hat{x}$ ($d = 0$),如图 5 (b)所示,重投影误差表示为

$$\epsilon = d'^2(x', \hat{x}'). \quad (11)$$

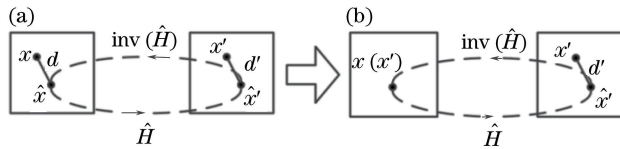


图 5 重投影误差示意图。(a) 强约束之前;(b) 强约束之后

Fig. 5 Sketch map of re-projection error. (a) Before strong constraint; (b) after strong constraint

图 4 中 P_n 在世界坐标系下的坐标为 $(X_{w,n}, Y_{w,n}, Z_{w,n})$, 将求得的位姿参数初值 ψ 、 θ 、 φ 和 T_x 、 T_y 、 T_z 代入(4)式,得到 P'_i 在像素坐标系下的坐标 (u'_n, v'_n) , 根据重投影误差构造非线性优化目标函数

$$J = \min F(\psi, \theta, \varphi, T_x, T_y, T_z) = \sum_{n=1}^{10} [(u_n - u'_n)^2 + (v_n - v'_n)^2]. \quad (12)$$

采用 Levenberg-Marquardt^[17]算法对(12)式进行迭代优化,当 F 取最小值时,重投影误差最小,即得到位姿参数的最优解,无人机根据该位姿参数实时调整姿态,实现着陆引导。

4 实验结果

4.1 实验平台搭建

为了验证本文方法,搭建了如图 6 所示的实验系统。该系统由紫外光源信标、双通道紫外成像系统、数据处理系统等部分组成。

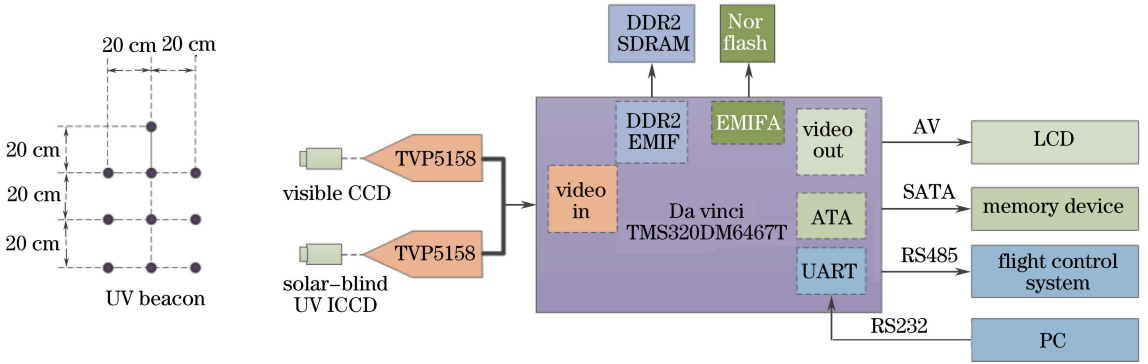


图 6 着陆引导系统实验平台

Fig. 6 Laboratorial platform of landing guidance system

紫外光源信标尺寸为 $60\text{ cm} \times 40\text{ cm}$, 相邻两光源之间的距离为 20 cm 。基于小孔成像模型,系统的有效探测距离与信标大小呈线性关系,信标越大探测距离越远。对于相邻信标,系统有限探测距离为 500 m ,远大于基于可见光成像的机器视觉的定位距离。对于实际使用的场合,信标将会是此信标的 $2\sim 3$ 倍,定位距离也更远。双通道紫外成像系统包含日盲区紫外通道和可见光通道,其中紫外通道的核心成像器件是日盲型紫外像增强管,像管光谱响应范围为 $200\sim 340\text{ nm}$,像管辐射增益大于等于 $5 \times 10^7\text{ cd/m}^2$,像管灵敏度在 254 nm 大于等于 20 mA/W ;窄带滤光片的峰值波长为 $264 \pm 3\text{ nm}$;像管与窄带滤光片配合使用将紫外系统工作波长限制在日盲区紫外波段 $240\sim 280\text{ nm}$ 。由于无人机对机载设备有严格的体积和重量限制,数据处理系统工作由嵌入式芯片 TMS320DM6467T 完成。TMS320DM6467T 为双核架构处理器,包含 ARM 9 处理器和 DSP C64+ 处理器,ARM 9 用于系统外设的控制,包括视频输入及输出、数据的发送及存储等,C64+ 用于实现图像处理算法和位姿求解算法。双核之间的通信以及数据传输遵从 TI Codec Engine 架构进行工作。

4.2 实验测试及分析

针对相关实验条件以及环境,以相机相对于信标的位置信息代表无人机的相对位姿参数。实验在距离信标 80 m 的范围内拍摄信标图像,每 10 m 范围内拍摄 15 张。图像分辨率为 1600×1200 ,焦距为 16 mm 。

图 7 为实验以及算法工作流程图,首先日盲区双通道紫外成像系统对紫外信标进行成像;其后由控制点提取算法得到像点像素坐标,根据控制点及其像点分别在世界坐标系和图像坐标系下的坐标得到相机相对于信标的位姿参数初值;然后将位姿参数初值作为已知量,计算控制点像点坐标得到重影误差,以控制点重投影误差最小化建立 Levenberg-Marquardt 非线性优化的目标函数,进行迭代优化,最终得到精确的位姿参数。

首先对控制点坐标提取精度进行分析,如图 8 所示。其中图 8 (a) 为非线性优化之前控制点坐标的提取

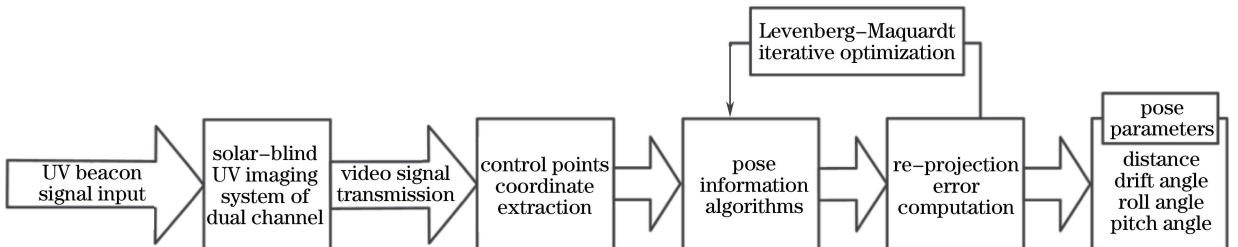


图 7 算法工作流程图

Fig. 7 Working flow chart of the algorithm

误差,误差较大且分布较为分散;图 8 (b)为非线性优化之后控制点坐标的提取误差,误差分布集中且均小于 0.5 pixel。可见,经过重投影误差最小化,控制点坐标的提取精度显著提高。

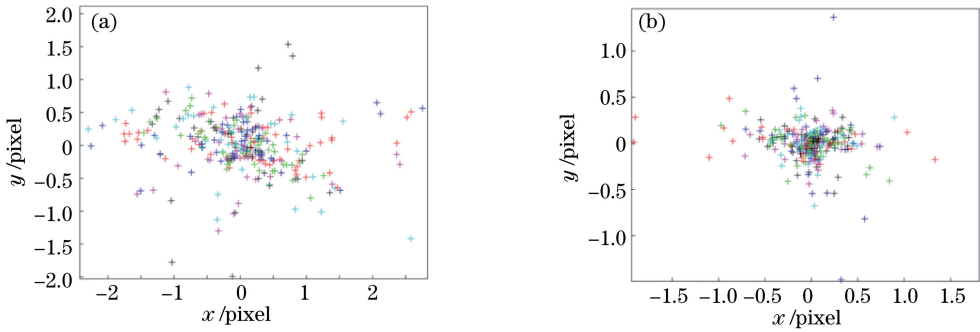


图 8 重投影误差。(a) 非线性优化前;(b) 非线性优化后

Fig. 8 Re-projection error. (a) Before nonlinear optimization; (2) after nonlinear optimization

然后分别对距离定位精度和角度定位精度进行分析。实验从 5 m 到 80 m 针对距离和角度定位分别采集 114 组数据和 100 组数据。表 1 为距离定位中前 16 组数据的定位数据, D 为摄像机与信标之间直线距离的真实值, D' 为测量值, dD 为测量误差, dD/D 为相对误差。以第 11 组测量数据为例,经相对位姿求解模型得到

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.0486 & 0.880 & 0.472 \\ 0.993 & -0.0915 & 0.0684 \\ 0.103 & 0.466 & -0.879 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = [-28.62 \quad -94.78 \quad 999.02], \text{ 则 } D = 1003.9 \text{ cm}, \psi = 174.06^\circ, \theta = 92.80^\circ, \varphi = 27.91^\circ.$$

表 1 距离定位测量部分数据

Table 1 Partial data of distance measurement

No.	D' /cm	D /cm	dD /cm	dD/D	No.	D' /cm	D /cm	dD /cm	dD/D
1	434.9	427	7.9	0.0185	9	936.8	933	3.8	0.0041
2	476.5	467	9.5	0.0203	10	950.0	942	8.0	0.0085
3	523.3	522	1.3	0.0025	11	1003.9	990	13.9	0.0140
4	579.2	571	8.2	0.0144	12	1088.9	1077	11.9	0.0110
5	688.9	683	5.9	0.0086	13	1274.5	1267	7.5	0.0059
6	814.3	806	8.3	0.0103	14	1335.1	1324	11.1	0.0084
7	994.3	992	2.3	0.0023	15	1374.2	1364	10.2	0.0075
8	940.4	938	2.4	0.0026	16	1449.4	1439	10.4	0.0072

图 9 (a)为距离定位误差分布散点图。对采样点数据进行拟合得到,误差分布近似为斜率为 0.0029 的线性分布。定位距离越近,绝对精度越高,随着探测距离变大,定位误差基本以线性关系增长。由此可见,此方法的距离定位相对精度优于 0.5%。在角度定位中,以偏航角的定位误差为例进行方法正确性的论证,测量中相机一直以相对于信标 45°的偏航角进行巡航拍摄。比较测量值与真实值,从图 9(b)可见,角度定位误

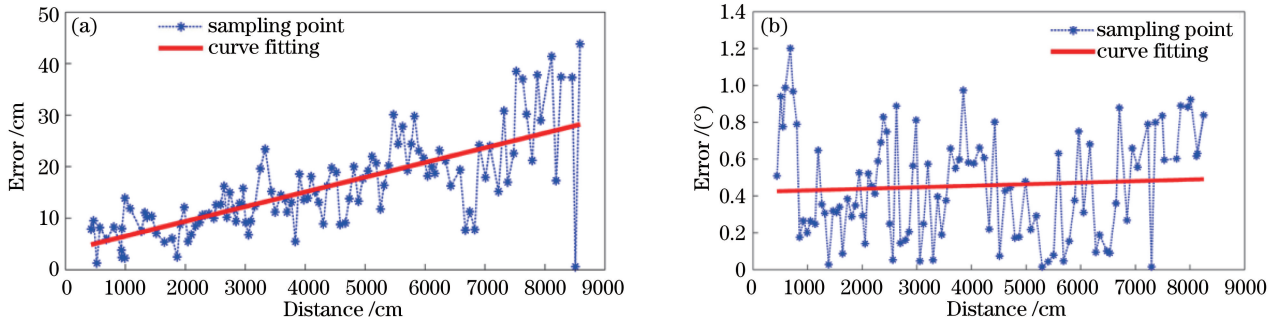


图 9 误差分布和曲线拟合。(a) 距离;(b) 角度

Fig. 9 Error distribution and curve fitting. (a) Range positioning; (b) angle location

差与测量距离的无相关性,绝对误差均小于 1° 。距离和角度定位精度均满足无人机着陆引导的精度要求。

基于实验测得的位姿参数,对相机相对于信标的空间位姿进行三维重建,如图 10 所示。图 10 (a)为前 52 组数据采样点的空间运动轨迹,图 10 (b)为第 25 组采样点根据位姿参数重建的相机相对于信标的空间位置。

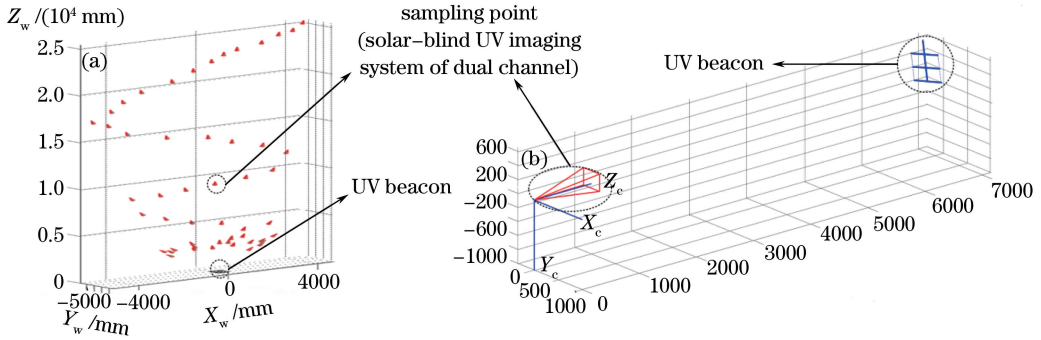


图 10 位姿信息三维重建。(a) 前 52 组采样点; (b) 第 25 组采样点

Fig. 10 3D reconstruction of pose information. (a) The first 52 sets of sampling points; (b) the 25th sampling point

实验数据表明,基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导技术而搭载的实验平台,距离定位的相对精度能够达到 0.5% ,角度定位的绝对精度优于 1° ,基本能够满足无人机着陆引导的精度要求。

5 结 论

无人机着陆引导技术研究具有重要的工程应用背景,针对无人机着陆引导技术往自主化、智能化方向发展的趋势,将日盲区紫外成像技术应用于基于机器视觉的定位技术中,设计了具有典型特征的紫外控制点,利用日盲区紫外成像技术消除自然光的背景干扰,大幅提高了定位引导的距离。基于 PNP 算法建立相对位姿求解模型,以 TMS 320DM6467 芯片为核心搭建嵌入式数据处理平台,满足了无人机机载设备体积小、质量轻、处理速度快等要求。

经实验验证,系统距离定位相对精度能够达到 0.5% ,角度定位绝对精度优于 1° ,能够满足无人机着陆引导的精度要求;同时其能够全天候工作并具有较强的抗干扰能力,能够提升无人机在恶劣天气下着陆引导的成功率。

参 考 文 献

- 1 Saripalli S, Montgomery J E, Sukhatme G S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle[C]. IEEE Proceedings of the 2002 Robotics and Automation, 2002, 3: 2799-2804.
- 2 Liu Shiqing, Hu Chunhua, Zhu Jihong. Study on computer vision-based approaches to estimate position and orientation of unmanned helicopter[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(4): 564-568.
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.
- 3 Yakimenko O A, Kaminer I I, Lentz W J, et al.. Unmanned aircraft navigation for shipboard landing using infrared vision [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2002, 38(4): 1181-1200.
- 4 Wang Lingyan, Xu Guili, Wang Biao, et al.. Research on segmentation of UAV's IR cooperative target based on machine vision[J]. Aero Weaponry, 2011, 5: 32-35.
汪凌艳, 徐贵力, 王 彪, 等. 基于机器视觉的无人机红外合作目标分割方法研究[J]. 航空兵器, 2011, 5: 32-35.
- 5 Wang Lin. Design of embedded dual-spectrum image acquisition and data processing system for UVC radiation detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
王 琳. 紫外辐射检测的嵌入式双光谱图像采集及数据处理系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- 6 Yao Li, Li Jiye. Ultraviolet short-range communication through atmosphere[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2006, 1(2): 135-139.
姚 丽, 李霁野. 大气紫外光近距离通信的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(2): 135-139.
- 7 Zhang Hongjia, Ma Jun, Zhu Haiyu, et al.. Design of "solar blind" ultraviolet zoom optical system used in corona detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102201.

- 张鸿佳, 马 军, 朱海宇, 等. “日盲”紫外电晕检测变焦光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102201.
- 8 Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022202.
- 9 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua, *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 943-948.
郝继贵, 李艳军, 叶声华, 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 943-948.
- 10 Gen Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 488-494.
葛宝臻, 李晓洁, 邱 实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 488-494.
- 11 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.*. Research of ultraviolet induced transmission filter for the solar blind system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0507002.
付秀华, 寇 洋, 刘冬梅, 等. 日盲系统紫外诱导滤光片的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0507002.
- 12 Wang L, Yang Y Y, Wang D D, *et al.*. Real-time portable dual channel image fusion and data processing system[C]. SPIE, 2009, 7283: 728307.
- 13 Zhou Xin, Zhu Feng. A note on unique solution conditions of the P3P problem[J]. Chinese Journal of Computer, 2003, 26(12): 1696-1701.
周 鑫, 朱 枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.
- 14 Yang Wenhui, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.*. Pose measurement system of double shield universal compact TBM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112005.
杨文辉, 林嘉睿, 高 扬, 等. 双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112005.
- 15 Wu Fuzhao, Hu Zhanyi. A note on the P5P problem with an uncalibrated camera[J]. Chinese Journal of Computer, 2001, 24(11): 1221-1226.
吴福朝, 胡占义. 摄像机未标定的 P5P 问题研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(11): 1321-1326.
- 16 Liu Zhaorong, Wang Zhiqian, Liu Shaomian, *et al.*. Research of precise laser spot center location algorithm [J]. Computer Simulation, 2011, 28(5): 399-401.
刘兆蓉, 王志乾, 刘绍锦, 等. 激光光斑中心精确定位算法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 399-401.
- 17 Heikkila J, Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Proceedings of the 1997 Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 1106-1112.
- 18 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908007.
王子辰, 戴 明, 李 刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908007.
- 19 Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. IEEE Proceedings of the 1999 Computer Vision, 1999, 1: 666-673.
- 20 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.