

无人飞行器远距目标识别与方位感知方法

于丁涛¹, 赵科东^{1,2}, 孙永荣¹, 付宇龙¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106;

2. “飞行器自主控制技术”教育部工程研究中心, 南京 211106)

摘要: 高精度的导航信息是无人飞行器编队完成各项任务的关键。针对无人飞行器利用视觉传感器对远距目标进行导航时存在目标成像特征少和多目标身份信息匹配困难的问题, 提出了一种基于光学标记的远距目标识别与方位感知方法。通过分析无人飞行器实际编队飞行需求, 设计了基于视觉的相对角度测量和身份 ID 识别的总体方案; 利用光学标记的闪烁特征设计了无人飞行器目标身份的编码解码, 并根据获取的灯光序列查询编码库解码识别目标 ID; 结合光学标记的成像特征实现标记的快速检测与跟踪, 在此基础上拟合标记的像素坐标并计算相对角度信息。实验结果表明, 在 50~150 m 的实验环境下, 静态测角误差优于 0.21°, 动态测角误差优于 0.73°, 可实现 10 个目标的身份 ID 识别。

关键词: 远距目标识别; 视觉角度测量; 灯光编码解码; 紫外标记; 无人飞行器; 相对导航

中图分类号: V249.31

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2025)03-0079-10

Remote target recognition and orientation perception for unmanned aerial vehicles

YU Dingtao¹, ZHAO Kedong^{1,2}, SUN Yongrong¹, FU Yulong¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Engineering Research Center of Autonomous Control Technology of
Aircraft, Ministry of Education, Nanjing 211106, China)

Abstract: High-precision navigation information is key to the formation of unmanned aerial vehicle (UAV) to perform various tasks. To address the problems of few target image features and difficulties in matching multi-target identity information when using visual sensors to navigate UAVs to remote targets, a method for remote target recognition and orientation perception based on optical markers is proposed. By analyzing the actual formation flight requirements of UAVs, a comprehensive approach of relative angle measurement and unique target ID identification based on vision is designed. The scintillation characteristics of optical markers are used to encode and decode target identities for UAVs, and the encoding database is searched according to the light sequence acquired to decode and identify the target ID. The optical markers can be quickly detected and tracked by combining the imaging features of the optical markers. Based on this, the pixel coordinates of the markers are fitted and the relative angle information is calculated. The experimental results show that within the environmental range of 50~150 m, the static angle measurement

收稿日期: 2024-07-19; **修订日期:** 2024-09-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ2024012)

作者简介: 于丁涛(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事视觉导航方面的研究。

通信作者: 赵科东(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事视觉导航方面的研究。

error is better than 0.21° , the dynamic angle measurement error is better than 0.73° , and the identification of 10 targets can be achieved.

Key words: Remote target recognition; Visual angle measurement; Light encoding and decoding; Ultraviolet marker; Unmanned aerial vehicle; Relative navigation

0 引言

无人飞行器具有小型化、低成本及高灵活性等特点^[1],其编队能有效提升任务完成的效率与成功率,在军用和民用领域均有广阔的应用前景。在编队执行任务过程中,无人飞行器的相对导航系统是队形维持及变换的重要保障,其精度直接影响编队的控制精度^[2]。在现有的相对导航系统中,常用的基于惯导/卫星组合的导航系统^[3]在卫星信号被遮挡时,定位精度会大幅度下降,还易受到人为干扰,在复杂环境下可靠性较差。相比之下,基于各传感器数据的相对导航系统^[4]具备高精度、抗干扰及全自主等优势,能有效解决复杂环境下的相对导航问题。目前,针对卫星拒止环境下的远距无人飞行器相对导航方法有基于数据链的相对导航^[5]、基于激光的相对导航^[6]等。数据链导航技术是通过计算数据链信息的传输时间测得飞行器之间的相对距离,同时数据链包含测角功能,可以实现飞行器间相对位姿的精确计算,还能实现编队内信息的共享。然而,数据链本质上也是无线电传输,易受复杂环境的影响。激光导航技术是通过发射激光光束,由接收到激光波束的无人飞行器经过内部信息处理单元解算得到信息,可实现千米级的相对角度与距离测量,测量精度高、抗干扰能力强,但价格相对昂贵,成本高。

基于视觉的测量方法因其灵活性、经济性及非接触性等特点,在机器人^[7]、自动驾驶^[8]、医学^[9]及航天^[10]等领域广泛应用。由于视觉测量精度与相对距离存在着密切的关系,国内外学者针对视觉测量技术的研究主要集中在近距情况下的相对位姿测量方面,在此范围内的物体成像面积较大,在画面中能很好地表现其视觉特征。例如,在航空领域,利用主动或被动的视觉测量方法解算加油锥套的位姿^[11-12],实现空中加油对接阶段的近距离相对导航任务;在工业领域,利用待检测目标的图像信息实现高精度的零件尺寸测量、产品质量控制^[13-14]等,具有较高的稳定性与测量精度;在自动驾驶领域,利用视觉三维测量技术实现汽车的路径规划、安全避障^[15-16]等,有效提高了自动驾驶技术的可靠性。然

而,远距目标在相机图像中所占面积非常小,损失了大量的纹理与颜色特征,几乎只有模糊的轮廓信息,近距离的位姿测量方法无法直接应用。

三维空间中2个目标的相对位置关系可由相对距离、方向角和高低角计算获得^[17]。由于单目视觉无法获得目标的深度信息,部分学者利用视觉角度测量与测距传感设备组合的方法估计空间目标的位置或位姿。刘柯等^[18]围绕航天活动中的测控任务,使用紧耦合形式融合相机和激光测距仪以优化位姿估计,得到较高精度的空间非合作目标的相对位姿;李振兴^[19]针对工业生产的位置姿态测量需求,结合红外视觉相机和激光位移传感器搭建了位置和姿态测量系统,利用红外靶标实现大尺寸工件的空间位置测量;Napolano等^[20]提供了一种多传感器相对导航模块,由相机和激光测距仪组成,通过在目标上安装反射标记实现小型卫星在轨服务的近距离操作。上述方法大都是针对已经确定的目标进行位姿或位置测量,得到的相对角度和相对距离信息可以直接应用,但在有多个目标的情况下,由于缺少目标身份ID,会出现测角与测距信息无法匹配的问题。

现阶段,类似超宽带(ultra-wideband, UWB)等测距技术^[21]较为成熟,具有低成本、高精度的优点,在相对导航领域广泛应用,可在通信范围内实现厘米级的相对距离测量。若能获取目标的角度信息,并且可以对其进行身份识别,就能结合测距设备感知的距离信息,恢复出目标的相对导航信息。因此,基于视觉的远距高精度相对角度测量、多目标的身份识别等技术的研究显得尤为迫切。

本文针对远距目标无人飞行器成像小、特征少的问题,开展远距视觉测量方法研究。通过分析无人飞行器编队实际应用需求,设计了视觉角度测量与身份ID识别的总体方案,并针对身份识别和角度测量这2个问题,开展了无人飞行器身份ID编码解码和动态方位感知的研究,这对复杂环境下的无人飞行器自主相对导航具有重要意义。

1 总体方案设计

1.1 无人飞行器自主相对导航需求分析

视觉导航的方法在相对导航领域已经有了广

泛应用,但在远距情况尤其是在需要大视场角相机的场景下,飞行器目标在相机中的成像极小,如图 1 所示,飞行器自身可利用的特征少,对于目标检测的难度非常大。并且,视觉测量的相对角度信息要与测距信息结合才能恢复出相对导航信息,在视野内有多个目标的情况下,测量的角度信息无法与测距信息匹配。传统通过在目标上布置人工标识^[22-24]用于识别 ID 的方法仅适用于近距离测量,因此需进一步设计远距情况的无人机身份编码。设计的编码应较容易识别,保证目标编号的唯一性,并具备较高的可靠性,从而提升复杂环境下目标识别的效率与准确度。编码的长度对目标识别效率也具有重要影响,使用的编码越长能表示的编码个数就越多,但相对的每个目标所需要的识别时间也会相应增加,进而影响相对导航系统的实时性。



图 1 远距无人飞行器目标

Fig. 1 Remote unmanned aerial vehicle target

1.2 基于光学标记的远距视觉测量方案

针对远距无人飞行器目标特征少、检测困难的问题,考虑特殊波段光线的穿透力,采用主动视觉

的方式,在目标表面中心区域布置 395 nm 波段的紫外光学标记,同时为相机加装 395 nm 滤光片,可以实现相机所采集的图像中仅包含紫外标记,而其他背景无法有效成像。紫外光源在通电后会呈现出亮度较高的紫色光斑,其在装有紫外滤光片的相机中的成像效果如图 2 所示,与周围环境有很高的区分度,这为目标特征的快速检测和精确的角度测量奠定了良好的基础。



图 2 紫外标记成像效果

Fig. 2 Imaging effect of ultraviolet markers

本文的总体方案设计如图 3 所示。视觉导航计算机通过标记点检测、跟踪获得标记点的定位结果与状态,分别用于目标相对角度的计算与身份 ID 的识别。将光学标记的中心点视作待检测目标中心,根据光学标记在图像中的成像位置,基于相机成像模型,完成相机坐标系下相对角度的求解。利用光学标记的闪烁特征设计无人飞行器的身份 ID 编码,通过分析连续图像中标记状态的时序信息,实现目标飞行器身份 ID 的解码识别,而后与相对角度信息匹配,获得视觉导航参数。

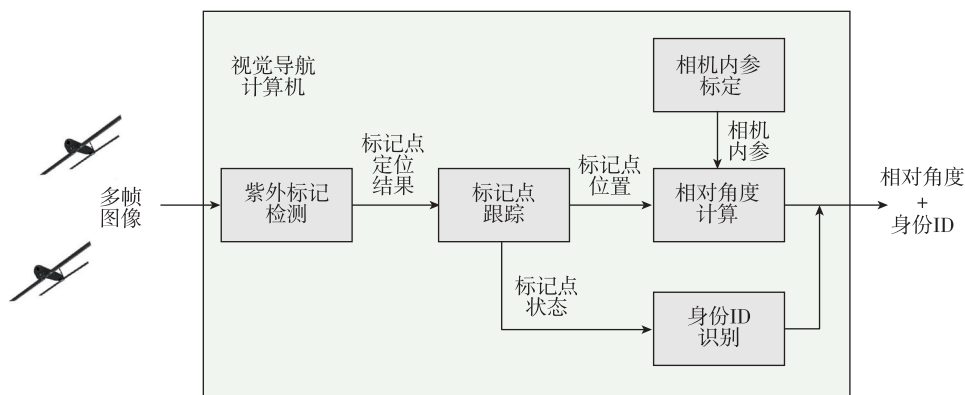


图 3 视觉导航总体方案设计

Fig. 3 Design of the overall scheme for visual navigation

2 灯光编码设计与解码

2.1 编码设计方案

无人飞行器身份 ID 的编码利用了光学标记在时序上的特征,将光学标记的一次常亮和一次熄灭状态视为灯光的一次闪烁。通过设定不同的常亮时间,实现灯光的快闪、正常闪和慢闪,分别代表不同的标志位,具体的设定如表 1 所示。

表 1 灯光编码设计
Tab. 1 Design of light encoding

状态	常亮时间/s	标志位
快闪	0.4	1
正常闪	0.7	2
慢闪	1.0	3
熄灭	—	0

目标的基础灯光序列在使用前设定,通过若干闪烁编码标志位的组合,可以表示不同的目标编码信息。以快闪与慢闪速度的组合为例,这 2 种闪烁灯光的标志位有如图 4 所示的 2 种组合方式,横轴代表灯光序列位置上的顺序,纵轴代表对应标志位。

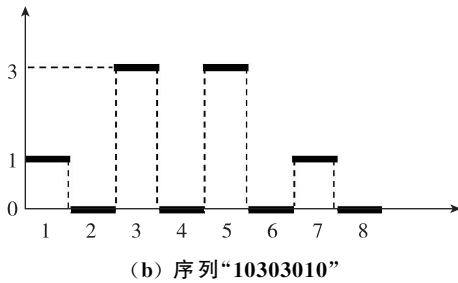
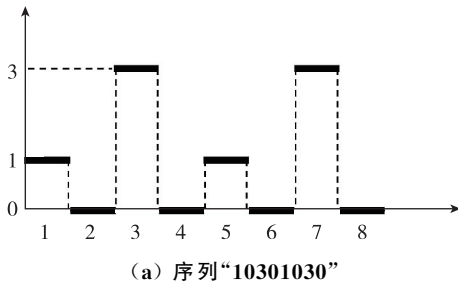


图 4 部分基础序列示意图

Fig. 4 Partial basic sequence diagram

2.2 编码序列解码方法

不同的基础灯光序列表示不同的编码信息,灯光序列的解码是实现目标身份 ID 识别的关键,具

体解码过程如图 5 所示。



图 5 灯光序列解码方法结构

Fig. 5 Structure of decoding method for light sequence

根据紫外标记状态计算标记的常亮时间 T_{on} 与熄灭时间 T_{off} ,以标记状态发生变化作为起始点和终止点,查询编码库将对应的标志位 flag 写入目标灯光序列,如式(1)所示。

$$\text{flag} = \begin{cases} 1, T_1 - \sigma < T_{on} < T_1 + \sigma \\ 2, T_2 - \sigma < T_{on} < T_2 + \sigma \\ 3, T_3 - \sigma < T_{on} < T_3 + \sigma \\ 0, 0 < T_{off} < T_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_1, T_2, T_3 是编码设计的灯光常亮时间; σ 是检测误差; T_0 是熄灭时间检测阈值。

获取灯光序列后,将其与设定的基础序列进行匹配并解码,以识别其对应的身份 ID 信息,灯光序列识别示意图如图 6 所示。为避免检测过程中因误检或环境干扰导致序列获取错误,需在后续序列中继续验证识别结果的有效性,对解码错误的目标信息及时修正,最终输出所有目标解码识别的身份 ID。

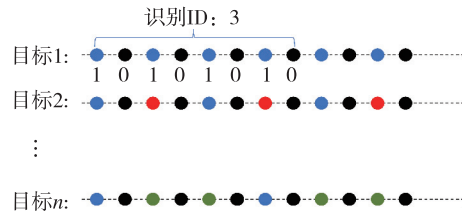


图 6 灯光序列识别示意图

Fig. 6 Light sequence recognition diagram

编码信息的解码时间与设定的标志位时间和周期有关,由于需要一次完整的编码序列闪烁才能识别出目标的身份 ID,所以理论上在检测到紫外标记后,至多需要 2 个闪烁周期时间即可获取目标 ID。因此,在实际工程应用中,需要根据目标识别数量等需求,选取合适的闪烁速度与周期内标志位的数量,共同构成基础灯光序列以建立样本库。

3 动态方位与编码信息感知

3.1 紫外标记特征提取

紫外标记在相机中成像清晰且亮度高,因此,

对于紫外标记的检测主要依赖于标记成像的亮度、几何形状等特征。利用紫外标记亮度高的特性,对图像采取灰度化、二值化等预处理操作,以突出图像中紫外标记的部分,便于后续特征提取和识别。

受阳光的影响,太阳本身和一些反光物在相机中也会呈现类似紫外标记的高亮区域,对紫外标记的检测造成干扰。从几何形状来看,太阳本身是规则的圆形,且成像面积远大于特征标记;而环境中的反光物体在相机中往往呈现出不规则的形状。相比之下,紫外标记的形状与大小则相对固定,所以可以将目标轮廓的几何特征作为一项判断指标,具体如下。

条件 a, 计算目标轮廓最小外接矩形的长 h 和宽 w , 最小外接矩形的长宽比需满足如下条件

$$k_d < \frac{h}{w} < \frac{1}{k_d} \quad (2)$$

式中, k_d 为限定参数, 取值范围为 $0.5 < k_d < 1$ 。

条件 b, 计算目标轮廓的面积 S , 目标轮廓的面积需满足如下条件

$$k_{11} < S < k_{12} \quad (3)$$

式中, k_{11} 和 k_{12} 为限定参数, 视具体光学标记大小而设置。

若提取到的目标轮廓相关参数满足条件 a 和条件 b, 则可以初步判断该轮廓为待检测目标的轮廓, 通过此方法筛选出图像中所有可能的目标。

紫外标记的成像大小受尺寸、距离和相机参数的影响。在目标紫外标记的检测中, 标记的成像大小是一项重要的检测指标, 其决定了探测目标的最大距离。经测试, 紫外标记像素至少需达到 60 个以上才可被稳定检测, 过少的像素区域会被当作干扰而排除。

3.2 视觉角度测量原理

视觉测角的重点在于目标质心点的选取。采用重心法求解光学标记的重心坐标作为目标的中心点, 将图像的像素视为密度函数 $V(i, j)$, $V(i, j)$ 是图像中点 (i, j) 的像素值, 那么光学标记的重心坐标 C 就可以表示为

$$C = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (4)$$

式中: m_{00} 是图像的零阶矩, $m_{00} = \sum_i \sum_j V(i, j)$; m_{10} 和 m_{01} 是图像的一阶矩, $m_{10} = \sum_i \sum_j iV(i, j)$, $m_{01} = \sum_i \sum_j jV(i, j)$ 。

空间中相机与目标飞行器的位置关系如图 7 所示。图 7 中, α 和 β 分别为待检测飞行器相对于相机光轴方向的方向角和高低角。

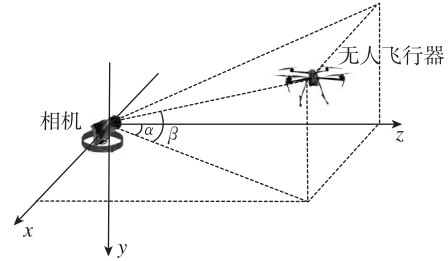


图7 相机与无人飞行器空间关系

Fig. 7 Space relationship between camera and unmanned aerial vehicle

将目标飞行器看成一个质点, 相机坐标系下一点的成像过程如式(5)所示。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & v_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

两边同时除以 Z_c , 得到

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & v_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)改写为

$$\begin{cases} \frac{X_c}{Z_c} = \frac{u - u_x}{f_x} \\ \frac{Y_c}{Z_c} = \frac{v - v_y}{f_y} \end{cases} \quad (7)$$

由此可以得到方向角 α 与高低角 β 的计算公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{X_c}{Z_c}\right) = \arctan\left(\frac{u - u_x}{f_x}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{Y_c}{Z_c}\right) = \arctan\left(\frac{v - v_y}{f_y}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 是点在相机坐标系下的坐标; $[u \ v \ 1]^T$ 是点在像素坐标系下的齐次坐标;

$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & v_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 是相机内参。

获得目标质心点在图像中的像素坐标后, 利用角度计算公式即可求解出目标相对于相机光轴方向的方向角与高低角。

3.3 标记点动态信息感知

基于灯光频闪信息的解码识别需要建立目标

前后帧的关系,由前一帧图像中的定位结果估计当前帧目标所在的区域,并在这个区域内进行光学标记的定位与状态检测。最后,更新标记点的当前状态,并利用标记位置真值修正目标跟踪结果,具体工作流程如图 8 所示。

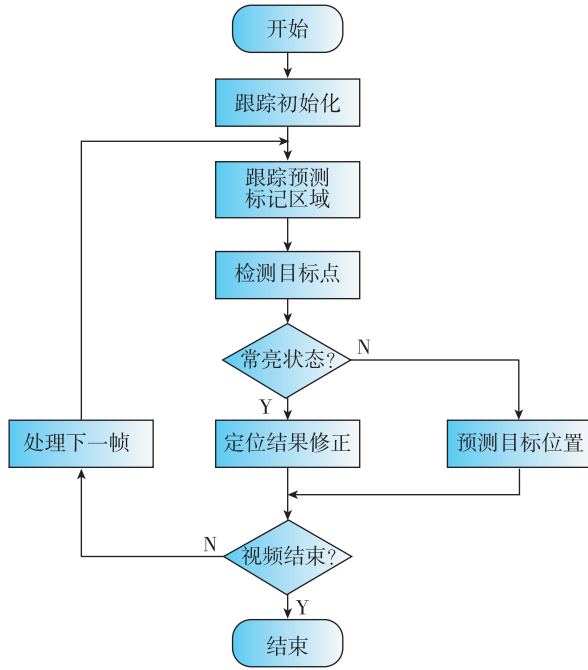


图 8 动态信息感知工作流程

Fig. 8 Flow of dynamic information perception

记第 $k-1$ 帧目标点的状态变量为 $\mathbf{x}_{k-1}$, 由位置 (p_x^{k-1}, p_y^{k-1}) 和运动速度 (v_x^{k-1}, v_y^{k-1}) 共同构成, 即

$$\mathbf{x}_{k-1} = [p_x^{k-1}, p_y^{k-1}, v_x^{k-1}, v_y^{k-1}]^T \quad (9)$$

第 k 帧的状态方程和观测方程可以分别表示为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 是第 k 帧目标的状态变量; $\mathbf{z}_k$ 是第 k 帧目标的观测变量; $\mathbf{A}$ 是状态转移矩阵; $\mathbf{B}$ 是控制输入矩阵; $\mathbf{u}_{k-1}$ 是系统控制量; $\mathbf{H}$ 是状态观测矩阵; $\mathbf{W}_{k-1}$ 是过程噪声; $\mathbf{v}_k$ 是测量噪声。

则考虑第 k 帧的目标点预测区域是以 (p_x^k, p_y^k) 为中心, 长 h 、宽 w 的矩形区域。

在目标点的预测区域内检测紫外标记的亮灭状态, 设定区域阈值 λ 作为光学标记状态的检测标准。当二值化图像中的白色区域 S_k 大于阈值 λ 时, 认定光学标记处于常亮状态, 反之则处于熄灭状态, 即

$$S_k \begin{cases} > \lambda, & \text{常亮状态} \\ \leq \lambda, & \text{熄灭状态} \end{cases} \quad (12)$$

当光学标记处于常亮状态时, 利用轮廓拟合计算得到目标点的真实位置, 以修正目标跟踪结果, 提高复杂环境下的目标跟踪鲁棒性; 若光学标记处于熄灭状态, 则利用预估值作为下一帧的跟踪起点。由此, 可以获取每一帧图像中紫外标记的定位信息以及灯光序列的编码信息。

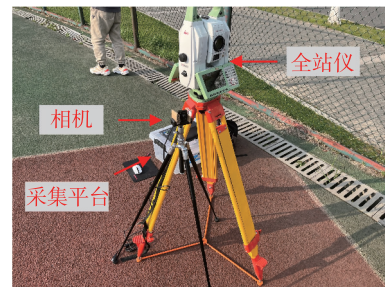
4 实验验证

为验证本文方法在实际环境下的视觉角度测量和身份 ID 识别效果, 在校园环境搭建了一套无人机目标角度测量与身份 ID 检验识别验证平台, 对动静态情况下的视觉角度测量精度和多目标身份 ID 的识别成功率进行评估测试。

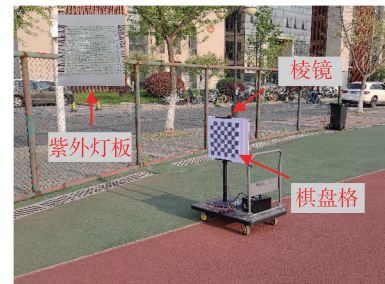
4.1 静态与动态测角性能评估实验

本实验根据图像中提取到的特征标记定位信息, 结合相机内参求得目标的相对角度, 并与全站仪提供的高精度定位信息作对比, 定量分析本文方法的测量精度。

搭建的实验场景如图 9 所示。相机选用型号为 HF868 的低成本通用串行总线 (universal serial bus, USB) 相机, 搭配焦距为 3.9 mm 的镜头, 以及 395 nm 波段滤光片。利用张正友标定法得到的相机内参为 $f_x = 1\,293.27$, $f_y = 1\,290.13$, $c_x = 997.96$, $c_y =$



(a) 固定平台



(b) 移动平台

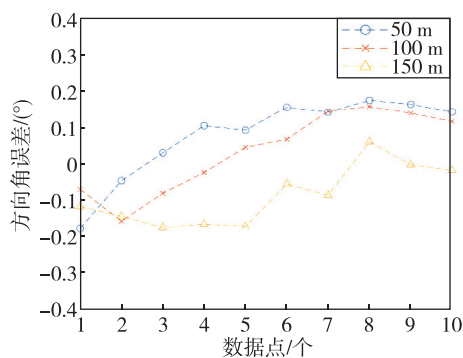
图 9 视觉角度测量精度评估实验场景

Fig. 9 Experiment scene for evaluating the accuracy of visual angle measurement

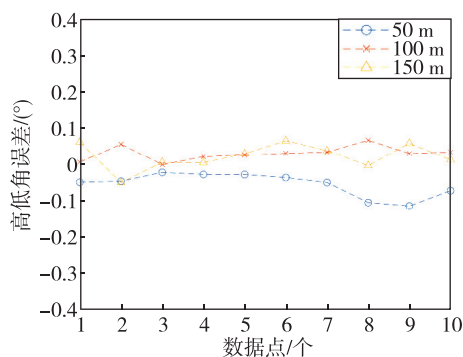
541.60。相机频率为 30 帧/s,图像大小为 $1\,920 \times 1\,080$ 像素。布置的光学合作标记是由 395 nm 波段紫外光源构成的灯板,尺寸大小为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 。全站仪选用的是徕卡 MS60,测距精度为 1.15 mm,测角精度为 $0.5''$,输出频率为 10 Hz,坐标变换后用作三轴定位真值。图像采集和实验数据处理的硬件平台均使用 Intel(R)Core(TM)i7-12700H 处理器,软件开发环境为 Ubuntu18.04,OpenCV3.4.16。

实验分为多位置静态测量和低动态运动测试两部分。在静态实验中,移动紫外标记的位置,分别在距离相机 50 m,100 m,150 m 处采集 10 组不同位置的图像信息,包含三轴方向上的移动,每个位置共采集 200 帧图像,剔除异常值后计算均值;在动态实验中,利用小车携带灯板作为移动平台,分别在 50 m,100 m,150 m 附近模拟目标低速运动,包含水平和垂直方向上的运动,每组实验统计 2 400 帧的实验结果。

图 10 和图 11 所示分别为 2 组实验方向角和高低角的误差曲线,图 12 所示为动态实验中目标水平和垂直方向上的运动速度曲线,表 2 和表 3 所示分别为 2 组实验相对角度的误差统计。从数据可以看



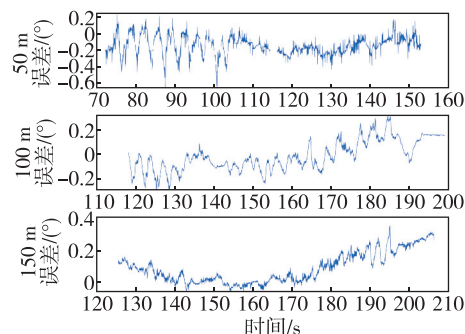
(a) 方向角误差



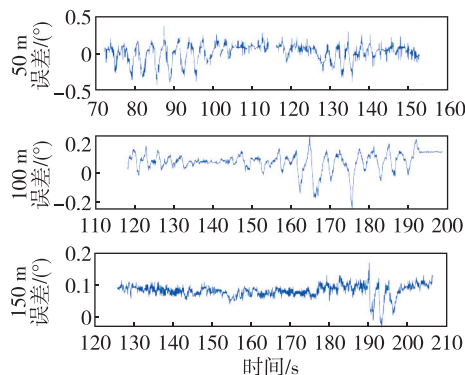
(b) 高低角误差

图 10 静态实验相对角度误差曲线

Fig. 10 Relative angle error curve of static experiment



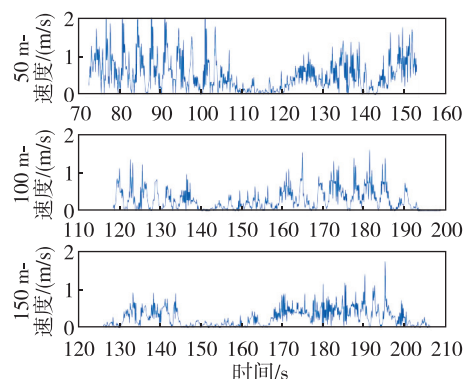
(a) 方向角误差



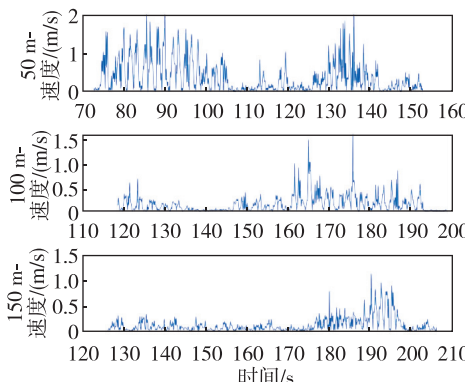
(b) 高低角误差

图 11 动态实验相对角度误差曲线

Fig. 11 Relative angle error curve of dynamic experiment



(a) 水平方向运动速度



(b) 垂直方向运动速度

图 12 动态实验速度曲线

Fig. 12 Velocity curve of dynamic experiment

表 2 静态多位置视觉相对测角误差

Tab. 2 Multi-position visual relative angle measurement error of static experiment

距离/m	相对角度均方差/(°)	最大相对角度误差/(°)
50	0.146 7	0.203 7
100	0.116 3	0.171 6
150	0.126 3	0.175 6

表 3 动态实验视觉相对测角误差

Tab. 3 Relative visual angle measurement error of dynamic experiment

距离/m	相对角度均方差/(°)	最大相对角度误差/(°)
50	0.217 4	0.725 9
100	0.158 7	0.373 2
150	0.155 0	0.368 6

出,目标静态情况下的相对角度测量误差优于 0.21° ,动态情况下优于 0.73° 。在实验中,同一目标在不同距离下的成像差异很大,例如 50 m 处紫外特征的成像个数就是 100 m 处的好几倍。在静态与动态精度评估实验中,本文方法都是在近距离处产生的测角误差较大,随距离增加,在 100 m 和 150 m 远距离下的测量精度表现相对较好。这是因为紫外标记在图像中成像是规则的光斑,当紫外标记板距离相机较近时,光斑在相机图像中所占面积就越大,拟合特征中心坐标产生的误差就越大,进而会影响到相对角度的测量精度;而 100 m 和 150 m 处则是因为紫外特征成像已经很小,测量精度主要受相机制作工艺等因素影响,所以测量误差相差不大。

4.2 多目标身份 ID 识别评估实验

在本实验中,提前设置编码信息以调整灯光闪烁速度,利用相机采集到的图像获取目标灯光序列后解码识别身份 ID,将识别的身份 ID 信息与编码库进行对比,统计多目标身份 ID 识别的成功率。

搭建的实验场景如图 13 所示。采集平台的中央处理器(central processing unit, CPU)选用的是 Intel(R) Processor N100,紫外灯板的尺寸为 $10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,相机和数据处理平台参数与视觉精度验证实验一致。

实验过程中,携带相机的旋翼机作为观测机在距离目标百米左右的空中悬停,同时控制另外 2 架旋翼机携带紫外标记灯板在空中随机运动作为移动目标,其余的紫外标记灯板作为静止目标摆放在地面。相机采集连续的图像序列,将所有目标都保持在相机视野范围内,共统计 4 600 帧的身份 ID 识



(a) 观测平台



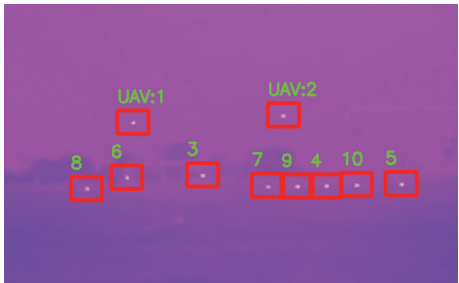
(b) 目标平台

图 13 多目标身份识别实验场景

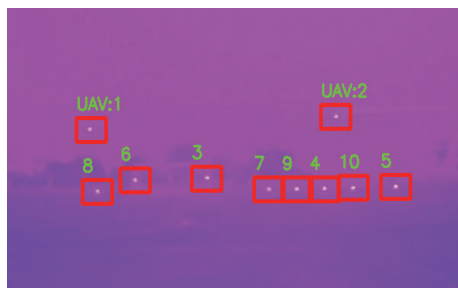
Fig. 13 Experiment scene for multi-target identity recognition

别的获取准确率。

实验中的部分身份 ID 识别结果如图 14 所示。实验结果显示,视觉处理平台解码识别的无人飞行器目标身份 ID 在统计的图像序列中均与设定的编码信息一致,2 架运动无人飞行器在移动过程中也可被稳定跟踪并识别。本文提出的无人飞行器目标身份 ID 解码识别方法在实验中表现出较高的成功率,这是因为解码识别的成功率与紫外标记的检测结果紧密相关,在紫外特征标记点可以稳定检测的情况下,计算出的灯光亮灭时间与真实值的误差小,得到的灯光序列就越准确,目标 ID 识别的成功率就越高;并且在首次识别出 ID 后对灯光序列的监测中,偶尔出现标志位的计算错误并不会对识别结果造成影响,即使首个周期内出现灯光序列误匹



(a) 第 450 帧识别结果



(b) 第1960帧识别结果

图14 多目标身份ID识别结果

Fig. 14 Identification results for the ID of multiple targets

配,也能很快根据后续的序列对匹配结果进行修正。

5 结论

本文针对无人飞行器视觉角度测量远距多目标时存在特征少和信息匹配困难的问题,开展了基于光学标记的远距目标识别与方位感知方法研究,主要结论如下:

1)为解决多个测量信息无法匹配的问题,根据紫外标记的特性设计了视觉角度测量与身份识别总体方案,重点提出了一种基于灯光闪烁时序信息的目标身份ID编码解码方法,可实现多无人飞行器目标的身份ID识别,并与相对角度匹配输出。

2)分别测试了静态和动态情况下的角度测量精度,静态测量误差优于 0.21° ,动态测量误差优于 0.73° ,可满足较高精度的角度测量需求;选取了10个目标进行身份ID实验,移动与静止目标均可正确输出身份ID,可通过调整灯光的闪烁速度等参数满足不同应用场景下的目标身份识别需求。

3)利用低成本的相机和紫外光源实现远距离下多个目标的角度测量任务,与现有的技术相比,本文提出的方法不依赖数据链通信,抗干扰能力强、经济效益高,可与远距离测距技术相结合,为无人飞行器自主相对导航提供较高精度的相对导航信息。

参考文献

- [1] YU N, FENG J, ZHAO H. A proximal policy optimization method in UAV swarm formation control[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 100: 268-276.
- [2] WANG S, ZHAN X, ZHAI Y, et al. Highly reliable relative navigation for multi-UAV formation flight in urban environments[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(7): 257-270.
- [3] 丁鑫, 龚柏春, 管叙军, 等. 无人飞行器集群仅测距初始相对位姿确定方法研究[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(5): 100-110.
DING Xin, GONG Baichun, GUAN Xujun, et al. Research on determining initial relative pose of unmanned aerial vehicles using a range-only method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(5): 100-110(in Chinese).
- [4] 刘梓轩, 孙永荣, 曾庆化, 等. 基于测距测角信息的DG-IEKF相对导航算法[J]. 导航与控制, 2021, 20(3): 34-43.
LIU Zixuan, SUN Yongrong, ZENG Qinghua, et al. Relative navigation technology based on DG-IEKF under the range and angle information[J]. Navigation and Control, 2021, 20(3): 34-43(in Chinese).
- [5] 李坤, 布树辉, 贾旋, 等. 基于惯性导航与数据链的飞机间相对定位方法[J]. 航空学报, 2024, 45(15): 260-272.
LI Kun, BU Shuhui, JIA Xuan, et al. Inertial navigation and data link-based relative aircraft positioning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(15): 260-272(in Chinese).
- [6] 陈龙. 高精度激光场相对导航技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.
CHEN Long. Research on high-precision laser field relative navigation technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024(in Chinese).
- [7] PATRUNO C, RENÒ V, NITTI M, et al. Vision-based omnidirectional indoor robots for autonomous navigation and localization in manufacturing industry[J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26042.
- [8] MEDINA-GARCIA A, DUARTE-JASSO J, CARDENAS-CORNEJO J J, et al. Vision-based object localization and classification for electric vehicle driving assistance[J]. Smart Cities, 2023, 7(1): 33-50.
- [9] ABUT S, OKUT H, KALLAIL K J. Paradigm shift from artificial neural networks (ANNs) to deep convolutional neural networks (DCNNs) in the field of medical image processing[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 244: 122983.
- [10] FOURLAS F, VISWANATHAN V K, SATPUTE S, et al. Vision based docking of multiple satellites with an uncooperative target[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 1394-1399.
- [11] 李华, 孙永荣, 赵科东, 等. 锥套定位的高精度点云特征提取算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 190-196.
LI Hua, SUN Yongrong, ZHAO Kedong, et al. High-

- precision point-circle feature extraction algorithm for refueling drogue positioning[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(9): 190-196(in Chinese).
- [12] ERKIN T, ABDO O, SANLI Y, et al. Vision-based autonomous aerial refueling; AIAA-2022-1384[R]. San Diego: AIAA, 2022.
- [13] 王艺璇. 机器视觉测量中的工件外轮廓提取方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- WANG Yixuan. Workpiece contour extraction method in machine vision measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020(in Chinese).
- [14] NOGUEIRA V V E, BARCA L F, PIMENTA T C. A cost-effective method for automatically measuring mechanical parts using monocular machine vision[J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 5994.
- [15] 孙环. 视觉导航下新型车辆避障路径智能规划方法[J]. *自动化与仪器仪表*, 2020(10): 39-42.
- SUN Huan. A new intelligent planning method for vehicle obstacle avoidance path under visual navigation[J]. *Automation and Instrumentation*, 2020(10): 39-42(in Chinese).
- [16] WANG D, YIN G, CHEN N. Optimisation of dynamic navigation system for automatic driving vehicle based on binocular vision[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2021, 39(3): 411-428.
- [17] 朱徐东, 赖际舟, 周本川, 等. 基于构型寻优的多无人机鲁棒自适应协同定位方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(7): 650-658+664.
- ZHU Xudong, LAI Jizhou, ZHOU Benchuan, et al. Robust adaptive cooperative localization method for multiple UAVs based on configuration optimization[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(7): 650-658+664(in Chinese).
- [18] 刘柯, 汪玲, 刘寒寒, 等. 一种空间非合作目标相对位姿紧耦合估计方法[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(6): 176-181+189.
- LIU Ke, WANG Ling, LIU Hanhan, et al. A tight coupling method for relative pose estimation of the spatial non-cooperative targets[J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(6): 176-181+189(in Chinese).
- [19] 李振兴. 基于红外视觉引导与激光测距的空间位置和姿态测量方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- LI Zhenxing. Research on spatial position and attitude measurement methods based on infrared vision guidance and laser ranging[D]. Changchun: Jilin University, 2023(in Chinese).
- [20] NAPOLANO G, VELA C, NOCERINO A, et al. A multi-sensor optical relative navigation system for small satellite servicing[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 207: 167-192.
- [21] 潘树国, 贾丰硕, 魏建雄, 等. 基于 UWB 单基站系统/INS 紧组合的智能车定位方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(12): 1196-1202.
- PAN Shuguo, JIA Fengshuo, WEI Jianxiong, et al. Intelligent vehicle positioning method based on UWB single base station system/INS tight combination[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(12): 1196-1202(in Chinese).
- [22] 熊雨农, 李宏. 一种基于靶标识别定位算法的视觉测量技术[J]. *测控技术*, 2023, 42(1): 28-34.
- XIONG Yunong, LI Hong. Vision measurement technology based on target recognition and location algorithm[J]. *Measurement & Control Technology*, 2023, 42(1): 28-34(in Chinese).
- [23] WANG W, PANG Y, AHMAT Y, et al. A novel cross-circular coded target for photogrammetry[J]. *Optik*, 2021, 244: 167517.
- [24] LIU Y, SU X, GUO X, et al. A novel concentric circular coded target, and its positioning and identifying method for vision measurement under challenging conditions[J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 855.

(编辑: 孟彬)