

文章编号: 1671-7449(2026)02-0151-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 151-160.

基于无人机视角的地面多军事目标速度估计方法

常文彪^{1,2}, 党长营^{1,2*}, 李建素^{1,2}, 李忠华^{1,2}, 陈雪丽^{1,2}, 王文媛^{1,2}, 马泽兵^{1,2}

(1. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051;

2. 金属凝固控制与增材制造山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:为解决现有单目速度估计方法对目标尺寸、灭点位置、场景标注物等关键先验信息的强依赖问题,提出一种基于无人机视角的地面多军事目标速度估计新方法。首先,通过多目标跟踪技术提取运动目标在连续帧序列中的轨迹信息,并结合视频帧率计算时间间隔;其次,利用无人机飞行高度与相机云台姿态角构建几何投影模型,建立像素坐标系与世界坐标系之间的映射关系,进而计算运动目标的真实位移距离;最后,通过实验验证所提测速算法的性能,并对几何投影模型的计算精度进行定量分析与评估。实验结果表明,在高空大于20.0 m的高度且姿态角小于30.0°时,测量相对误差不超过2%。与其它测速方法相比,所提方法在不依赖目标尺寸、灭点位置、场景标注物等先验信息的前提下,满足战场态势感知中运动目标速度估计的需求,为速度估计提供了一种适应性更高的新方法。

关键词: 速度估计; 单目测量; 无人机视角; 运动目标; 几何投影模型

中图分类号: TP96

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026014

引用格式: 常文彪, 党长营, 李建素, 等. 基于无人机视角的地面多军事目标速度估计方法[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 151-160.

CHANG Wenbiao, DANG Changying, LI Jiansu, et al. Speed estimation method of military targets based on perspective of unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 151-160.

Speed Estimation Method of Military Targets Based on Perspective of Unmanned Aerial Vehicles

CHANG Wenbiao^{1,2}, DANG Changying^{1,2*}, LI Jiansu^{1,2}, LI Zhonghua^{1,2}, CHEN Xueli^{1,2},
WANG Wenyuan^{1,2}, MA Zebing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Controlled Metal Solidification and Additive Manufacturing, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the strong reliance of existing monocular speed estimation methods on key prior information such as target size, vanishing point position, and scene markers, a new method for estimating the speed of multiple ground military targets from a drone perspective is proposed. Firstly, the trajectory information of moving targets in consecutive frame sequences is extracted through multi-target tracking technology, and the time interval is calculated in combination with the video frame rate. Secondly, a geometric projection model is constructed using the flight height of the drone and the camera gimbal attitude

【收稿日期】2025-03-18

【基金项目】太原市“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0104); 山西省科技创新人才团队专项资助项目(202304051001015); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202201150401019)

【作者简介】常文彪(2002—), 男, 硕士生, 主要从事机器视觉研究。E-mail: cwb5397@163.com。

*【通信作者】党长营(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事人工智能、精密测量、机器视觉研究。E-mail: dcy@nuc.edu.cn。

angle to establish the mapping relationship between the pixel coordinate system and the world coordinate system, and then the real displacement distance of the moving target is calculated. Finally, the performance of the proposed speed measurement algorithm is verified through experiments, and the calculation accuracy of the geometric projection model is quantitatively analyzed and evaluated. The experimental results show that when the flight height is greater than 20.0 m and the attitude angle is less than 30.0° , the relative measurement error does not exceed 2%. Compared with other speed measurement methods, the proposed method meets the requirements of speed estimation for moving targets in battlefield situation awareness without relying on prior information such as target size, vanishing point position, and scene markers, providing a more adaptable new method for speed estimation.

Key words: speed estimation; monocular measurement; unmanned aerial vehicle perspective; moving target; geometric projection model

0 引言

在现代军事战略体系中,无人机凭借其多功能性、低成本、高效率以及强大的环境适应力等优势,被广泛应用于侦察监视、目标定位与打击、后勤支援等多维作战任务中,逐渐成为现代战场中不可或缺的关键作战力量。特别是在侦察监视领域,无人机凭借其全天候、高精度、实时性的信息获取能力,已成为战场态势感知与关键情报收集的核心手段^[1]。但是,现有无人机传回的图像和视频数据主要用于操控人员的目视判断及识别,缺乏更深层次的智能化分析与处理能力。在复杂的战场环境中,军事目标的速度信息对于目标跟踪、威胁评估、武器部署、战术决策、情报分析以及减少误伤等方面至关重要,是现代战争中不可或缺的能力。

基于视觉的测速方法可分为两类:多目视觉方法和单目视觉方法。多目视觉方法按照特定几何关系布置两台或多台相机进行同步拍摄,利用图像匹配算法实现特征点匹配,进而重建目标的三维运动轨迹,并通过三维坐标变化计算目标速度^[2-3]。该方法具有较高的轨迹重建精度,且无需依赖目标的尺寸、形状等先验信息。然而,多相机系统的布置需确保基线稳定,且标定过程复杂,涉及同步触发与外参标定,此外,较高的硬件成本限制了其大规模部署的可行性^[4-6]。而图像匹配与三维重建算法的高计算复杂度导致其实时性不足,难以满足战场环境中军事目标的测量需求。

单目视觉方法通过目标跟踪与相机标定技术,建立像素坐标与三维世界坐标的映射关系,并结合时间差估算目标速度。该方法具有算法复杂度低、

实时性高、硬件成本低以及部署简便等优点,仅需单个摄像头即可实现测量。但是,由于缺失深度信息,其精度受到限制,且通常需要依赖额外的先验信息进行计算。现有的工作一般分为两类。一类是使用场景中的先验信息,如鱼朋波^[7]、Ke等^[8]、Long等^[9]对高速公路的汽车进行测速,需已知车道线的间距和宽度;梁建术等^[10]和Biswas等^[11]使用场景中的匹配点进行相机校准,这类方法会限制场景的适应性。第二类方法是使用目标尺寸作为先验信息,如陈彬等^[12]、邢书浩等^[13]、Li等^[14]和da Silva等^[15]分别使用绝缘子之间的距离、船舶长度、车辆长度作为先验信息进行测量,这类方法会限制目标的适应性,这一局限性成为制约其普适性与实用性的关键问题。

综上所述,现有的多目视觉方法由于算法复杂度高、部署复杂,难以适应战场环境的实时性与动态性需求;而单目视觉方法通常依赖于场景中的先验信息,降低了其场景适应性与部署灵活性^[16-17]。

因此,本文提出一种基于无人机视角的地面多军事目标速度估计方法。首先,通过目标跟踪技术获取目标在连续帧序列中的运动轨迹及时间信息;其次,构建像素坐标系与三维世界坐标系之间的几何投影模型,有效解决了现有方法对场景尺寸信息的强依赖问题;最后,提出一种分步求解运动目标速度的计算公式,与传统直线速度公式不同,该方法能够计算曲线轨迹下的目标速度,从而提升了复杂场景中的测速精度与适用性。

1 算法原理

本文方法的算法原理如图1所示,主要包括像素轨迹坐标求解、几何关系构建和速度求解3个核

心模块。像素轨迹坐标求解模块旨在通过对目标在不同帧中进行连续定位与关联,获取高精度且连续的像素级轨迹信息,包括帧的序列、目标ID、目标类别及像素坐标;几何关系构建模块通过建立像素坐标系与三维世界坐标系之间的映射关系,将上一步得到的像素轨迹信息中的像素坐标作为输入,计算出三维世界坐标,实现从像素轨迹信息到三维世界轨迹信息的转换;速度求解模块则基于运动路程与时间间隔的计算求解关系,最终推导出目标的速度值。使用分步计算的方法,提升了复杂场景下目标速度估计的精度与鲁棒性。

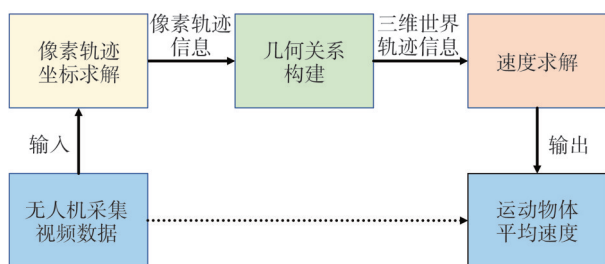


图 1 算法原理图

Fig. 1 Algorithm schematic diagram

1.1 像素轨迹坐标求解

为了解决视频测速中多目标场景下目标关联与轨迹求解的难题,提出了一种基于多目标跟踪技术的像素轨迹坐标求解方法。速度求解的核心在于基于时间戳的距离估计,而物体的像素轨迹

能够提供其在连续时间点上的位置信息。然而,在多目标场景中,如何在连续的图像帧中精确关联同一目标是一个关键问题。针对此,本文采用多目标跟踪技术来求解物体的像素轨迹坐标,其核心优势在于能够在复杂的战场环境中实现对多个目标的精准识别与稳定跟踪,从而为后续的速度估计提供可靠的轨迹数据支持。

在战场环境下,跟踪算法需要同时满足高精度与实时性的双重需求,通常分为基于检测式的和无检测式的方法。近年来,先进的边界框回归方法和训练方法进一步增强了跟踪器的判别能力和准确性,使得基于检测式的跟踪算法在精度上通常优于无检测式的跟踪算法^[18]。为兼顾精度与实时性,本文选择YOLO算法作为目标检测器。YOLO系列是主流的目标识别算法,其各个版本和改进算法在多个领域得到了广泛应用。YOLOv11是Ultralytics YOLO系列实时目标检测器的最新算法,其在COCO数据集上实现了更高的平均精度,同时,参数量比YOLOv8m减少了22%,显著提升了计算效率,符合军事目标测速需求。同时,选择简单高效的ByteTrack^[19]作为跟踪器,其算法结构简洁、计算效率高,能够满足战场环境速度估计的实时性要求。

YOLOv11网络结构如图2所示,相较于以往模型,YOLOv11采用了改进的主干网络和颈部结构,进一步增强了特征提取能力。

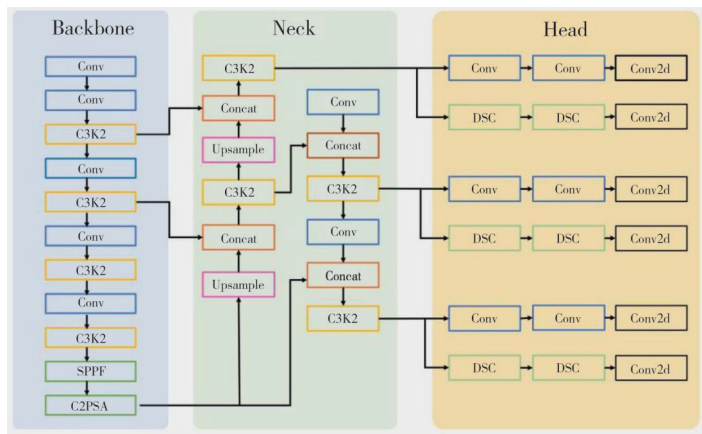


图 2 YOLOv11 结构简图

Fig. 2 Simplified structure diagram of YOLOv11

YOLOv11将原有的C2f模块替换为C3K2模块,不仅保留了C2f模块的高效性,还结合了C3模块的精度优势,同时支持可变卷积核大小的自由选择。此外,主干网络中引入了C2PSA模块,该模块结合了点空间注意力机制与金字塔结构,能够捕捉多尺

度特征,并通过通道注意力机制动态调整特征权重,从而增强模型对关键特征的关注能力,显著提升了对小目标的检测精度。在Head部分,YOLOv11通过在解耦头中引入两个深度可分离卷积,有效减少了参数量和计算量,进一步提高了推理速度。

在对待测目标进行实时检测后,需进一步通过目标跟踪技术获取其在不同时刻的运动轨迹。本文采用YOLOv11结合ByteTrack跟踪算法,实现了对低分检测框的处理。与传统跟踪算法直接删除低分框不同,ByteTrack将低分框与未匹配的预测框进行进一步关联分析。该方法能够有效应对目标遮挡问题,同时保持较低的ID切换频率,显著提升了密集军事目标的跟踪精度,为后续速度估计提供了高精度的帧序列像素位置信息。

1.2 几何关系构建

像素坐标系作为一种离散的坐标系统,无法直接反映物体在真实世界中的空间位置与尺寸信息,因此,需要将像素轨迹坐标转化为三维世界轨迹坐标。根据针孔相机模型的透视投影原理,相机坐标系到图像坐标系的转换遵循中心透视投影规律,而根据三角形相似原理,求解三维世界坐标需已知深度信息或三维世界中的已知长度信息。然而,深度相机通常比普通相机更重、体积更大、成本更高,并且在速度估计时,不需要得到每个像素点的深度,而深度相机往往会产生大量的无用数据。因此,现有研究大多依赖三维世界中待测目标或场景中的已知尺寸信息进行计算,严重限制了算法的场景适应性与普适性。

针对上述问题,本文充分利用无人机搭载传感器能够快速获取相机姿态参数以及距地面高度的技术优势,采用了一种基于几何关系的三维世界轨迹坐标计算方法。该方法首先考虑无姿态的情况,得到无姿态时地面上两点的直线距离计算公式,然后考虑相机有姿态时,地面上两点距离的计算方式,实现在任意姿态时,给定图像两点像素坐标,可以计算出真实世界的坐标。

1.2.1 无姿态时直线距离求解

建立如图3所示的坐标系,地面为 xoy 平面,无人机距地面的高度为 H ,相机的光心为 O ,焦距为 f , d 为图中两点的像素距离。根据针孔相机的成像原理,此时真实距离 s 可根据相似性原理算出,

$$\frac{s}{dp} = \frac{H}{f}, \quad (1)$$

式中: s 为真实距离; d 为对应的像素距离; p 为像素的物理尺寸; H 为光心距离地面的高度; f 为相机的焦距。变形后可得 s 的计算公式为

$$s = \frac{Hdp}{f}. \quad (2)$$

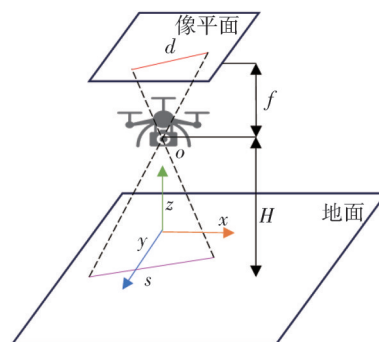


图3 无姿态时距离计算示意

Fig. 3 Illustration of distance calculation without attitude

1.2.2 有姿态时直线距离求解

对于相机的3个姿态角,显然相机的航向角(绕 z 轴旋转的角)不会对测量速度产生影响,因此,这里考虑相机的俯仰角和翻滚角。

首先,计算出相机的旋转矩阵 R 为

$$R = R_y(\alpha) \cdot R_x(\theta), \quad (3)$$

式中: $R_y(\alpha)$ 和 $R_x(\theta)$ 分别为绕 y 轴和绕 x 轴旋转的旋转矩阵。

在针孔相机模型中,像平面上的点 (u, v) 对应于从相机光心发出的一条光线。因此,可以使用归一化图像坐标 $(x_n, y_n, 1)$ 来表示入射光线在相机坐标系中的方向向量 r 。

$$r = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u - c_x}{f_x} \\ \frac{v - c_y}{f_y} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: u 和 v 为点的像素坐标; c_x 和 c_y 为图像的主点坐标; f_x 和 f_y 为相机在 x 和 y 方向上的焦距长度。

然后,计算世界坐标系下入射光线的方向向量 r'_0 ,由于方向向量是一个自由向量,只表示方向,不依赖于原点的位置,因此,方向向量变换为世界坐标系仅需要考虑旋转矩阵,可以忽略平移矩阵,计算公式为

$$r' = R \cdot r_{\text{norm}} = R \cdot \frac{r}{\|r\|}. \quad (5)$$

已知入射光线的方向向量 r' 和入射光线经过光心 $(0, 0, H)$ 后,就可求出入射光线的直线表达式如式(6),即可以进一步求出世界坐标系中地面上物体(与 xoy 平面的交点)的坐标 (X, Y, Z) 。

$$\frac{X}{r'_x} = \frac{Y}{r'_y} = \frac{Z-H}{r'_z} \quad (6)$$

当 $z=0$ 时,可得到地面上点的坐标为

$$\begin{cases} X = -\frac{Hr'_x}{r'_z}, \\ Y = -\frac{Hr'_y}{r'_z}. \end{cases} \quad (7)$$

在相机有姿态时,地面上两点的距离计算公式为

$$s = \sqrt{\left(\frac{Hr'_{x1}}{r'_{z1}} - \frac{Hr'_{x2}}{r'_{z2}}\right)^2 + \left(\frac{Hr'_{y1}}{r'_{z1}} - \frac{Hr'_{y2}}{r'_{z2}}\right)^2}, \quad (8)$$

式中: H 为相机光心到地面的高度; r'_{x1} , r'_{y1} , r'_{z1} 和 r'_{x2} , r'_{y2} , r'_{z2} 分别为第1个和第2个点的入射光线方向向量的分量。

1.3 速度估计

现有研究大多基于两帧之间物体的直线距离差来求解速度,这种方法仅适用于直线运动场景。然而,在实际应用中,目标的运动轨迹通常为曲线或无规则路径,其运动路程无法通过简单的直线距离计算得到。因此,本文提出一种分步累加的计算方法,通过分段近似求解曲线轨迹的运动距离,从而更准确地估计目标速度。

基于式(8),可以通过图像中两点的像素坐标计算出三维世界中两点的直线距离。在时间间隔足够短的情况下,物体的运动轨迹可近似为直线段。本文借鉴微积分思想,将运动轨迹分解为多个微小直线段,通过累加各段距离来计算总运动

路程,进而实现对目标速度的精确估计。

物体运动的总时间 T 为

$$T = (n-1)\Delta t, \quad (9)$$

式中: n 为帧数; Δt 为帧间隔。

物体运动的总路程 S 为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s_i, \quad (10)$$

式中: s_i 为第 i 帧到第 $i+1$ 帧之间的真实距离,由式(8)算出。

而在实际计算中,当物体运动速度较小时,相邻两帧之间的物体位置接近于0,导致计算出的距离为0,从而无法准确估计速度。为了解决这个问题,引入步长 k 来优化公式,最终速度计算方法为

$$v = \frac{\sum_{j=1}^{n-k} s_j}{(n-k)k\Delta t}, \quad (11)$$

式中: s_j 为第 j 帧到第 $j+k$ 帧之间的真实距离; k 为步长。较大的步长 k 会减少计算量,但可能会丢失运动细节,较小的步长 k 会增加计算量,但能捕捉更多的运动细节。实际计算中需根据物体运动的速度大小和运动轨迹选择。本文利用最小位移阈值和最大方向变化阈值来搜索步长 k 的范围。

如图4所示,算法分为2个部分:首先,逐步增大 k 并计算位移,直至位移超过预设的阈值,得到步长 k 的最小值;然后,在 $k_{\min}$ 的基础上,继续增大 k 并计算方向的改变量,直至方向变化超过预设的阈值,得到 k 的最大值。

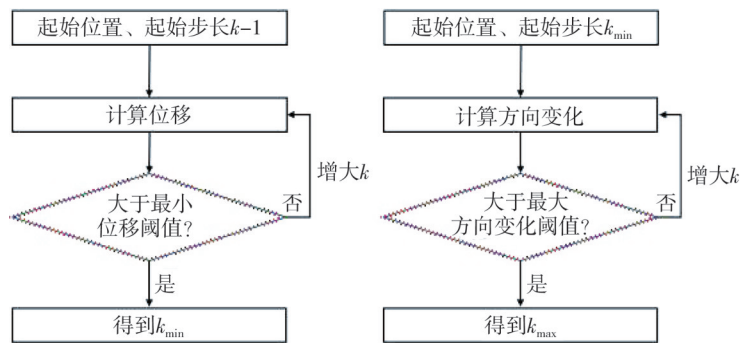


图4 k 搜索策略

Fig. 4 k search strategy

1.4 算法流程

本文方法的算法流程如图5所示,主要有以下3个步骤。首先,在目标跟踪与像素轨迹获取阶段,以无人机采集的视频数据作为输入,利用YOLOv11进行目标检测与跟踪,获取目标的像素

轨迹坐标和序列信息。

其次,在坐标转换与三维轨迹计算阶段,通过无人机传感器和云台参数获取相机的高度与姿态信息,并结合镜头厂商提供的焦距长度与主点坐标,基于1.2节中的几何关系模型,将像素轨迹坐标转换为三维世界轨迹坐标。

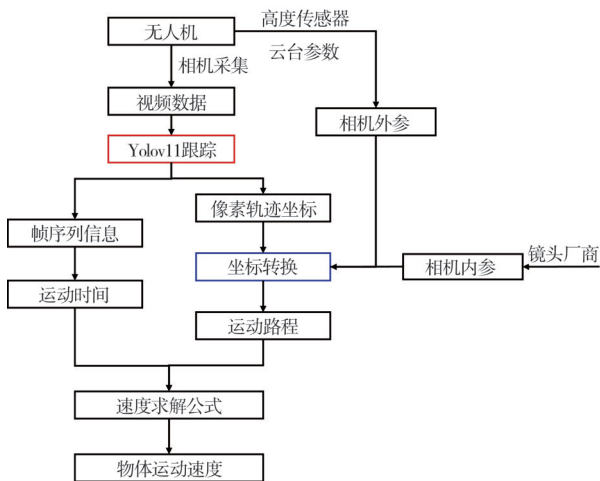


图5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart

最后,在运动路程与速度计算阶段,采用分步累加的方法计算目标的运动总路程,并通过帧间隔与运动帧数计算时间间隔,最终基于速度求解公式得到目标的运动速度。

2 实验结果与分析

为验证本文方法的性能,使用整体平均精度(mean Average Precision, mAP)评估目标检测器的精度,确保检测结果的可靠性;使用帧率评估跟踪器的实时性,验证算法在复杂场景中的适用性;此外,由于无人机或云台的抖动会导致相机的高度、姿态产生误差,本文定量分析相机外参对距离求解精度的影响,为算法的实际应用提供参考依据。

2.1 跟踪性能实验

2.1.1 数据集和评价指标

本文使用校园数据集进行实验验证,主要因为军事数据通常具有高度敏感性与保密性,难以公开获取与使用,而校园数据集易于获取与处理,能够有效验证算法的性能与鲁棒性,为后续军事场景的应用奠定基础。实验数据为无人机在不同姿态下采集的校园数据,涵盖行人、车辆和电动车等目标类别,同时,使用数据增强技术扩充数据集,得到实验数据共1 440张。实验采用迁移训练的方式,使用数据对预训练模型进行微调。其中,1 007张图像用于训练,288张图片用于验证,145张图片用于测试,示例数据如图6所示。

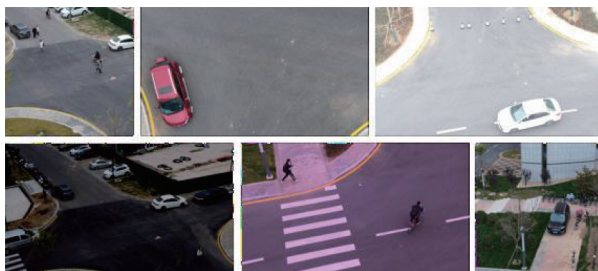


图6 检测数据示例

Fig. 6 Examples of test data

2.1.2 检测器性能分析

完成数据集的建立后对网络进行训练,训练参数如表1所示。

表1 训练参数

Tab. 1 Training parameters

参数	值
训练框架	Pytorch
硬件设备	NVIDIA RTX 4060
数据集	校园模拟场景数据集
训练轮数	50
批量大小	8
优化器	SGD
学习率调度	STEP

训练完成后,在测试集上对模型性能进行评估,得到模型的精确率-召回率曲线,如图7所示,图中纵坐标为精确率,表示预测为正例的样本中预测正确的比例;横坐标为召回率,表示被预测正确的正例占总实际正例样本的比例。通过调整分类阈值,计算不同阈值下的精确率和召回率,曲线下的面积即为模型在单个类别上的平均精度,用来反映模型在所有阈值下的平均性能。从图中可知,单个类别的平均精度均超过95.0%,mAP值达到99.0%。

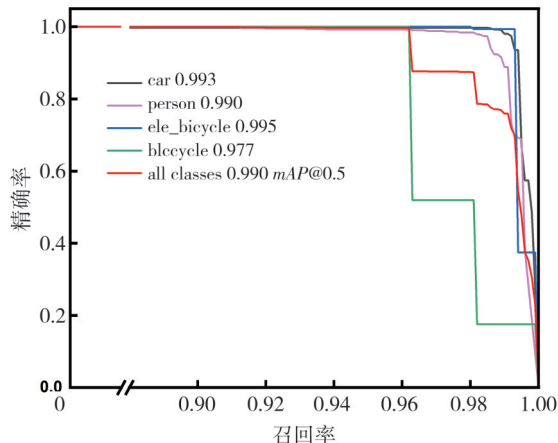


图7 精确率-召回率曲线

Fig. 7 Precision-recall curve

图8展示了模型的可视化检测结果,验证了其在实际场景中的有效性。

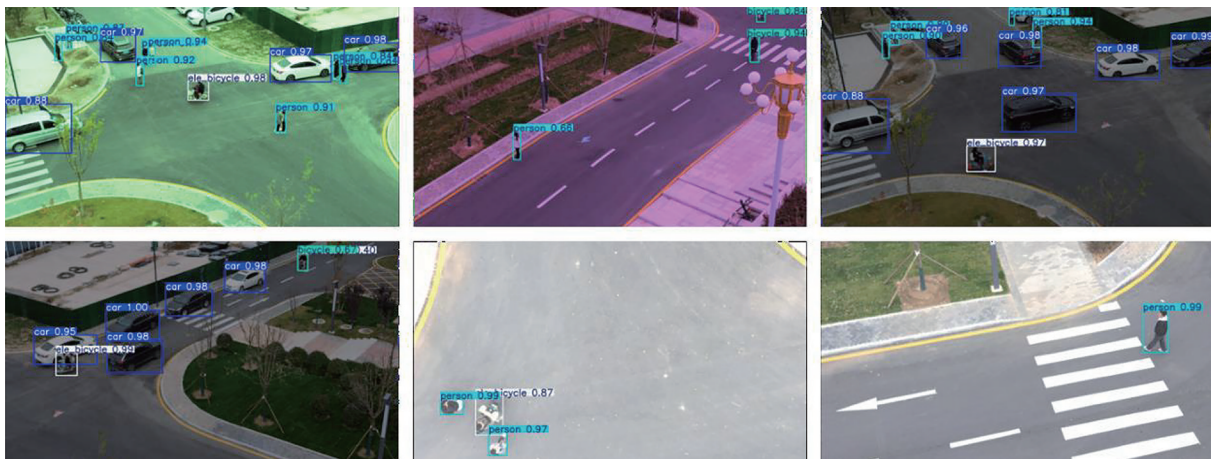


图 8 可视化检测结果

Fig. 8 Visual detection result

2.1.3 跟踪器性能分析

为验证多目标跟踪算法的性能,本文将训练好的 YOLOv11 网络作为 ByteTrack 算法的检测器,并在校园数据集上进行测试。

测试视频共包含 4 440 帧,检测总耗时为

135.52 s, 计算得到帧率为 32.75 帧/s, 满足实时性要求,符合测速需求。

图 9 展示了跟踪结果的可视化效果,表明该算法能够准确跟踪高速运动的车辆与低速运动的电动自行车,满足预期的测速需求。



图 9 可视化跟踪结果

Fig. 9 Visual tracking results

2.2 距离求解精度分析实验

2.2.1 数据集与实验方法

在速度求解过程中,时间信息由帧序列求解,由于其高精度的计时机制与稳定的帧生成速率,该部分的误差较小。而距离求解的精度由于空中气流等因素,相机姿态不稳定导致无人机在实际数据采集过程中相机外参误差的影响较大。因此,距离求解的误差远大于时间求解误差,速度求解精度主要取决于坐标转换的精度。

为分析无人机高度和姿态对速度求解精度的

影响,排除其他变量的影响,本节实验采用单一变量控制法,无人机要求在空中稳定悬停,相机的焦距长度 f_x 和 f_y 为 2 904 mm/pixel,主点坐标 (c_x, c_y) 为(2 000, 1 500)。本文通过计算机模拟针孔相机成像过程生成标准数据,并在计算过程中添加误差量,通过计算相对误差评估求解精度。

2.2.2 高度误差对测量精度的分析

为了探究高度误差对测量误差的影响,在 5~50 m 的范围内进行实验。高度误差水平为[0.1 m, 0.2 m, 0.3 m],实验结果如图 10 所示,横坐标为无人机所在的相对高度,纵坐标为测量的相对误差,虚线表

示测量误差为2%的参考线。从图 10 中分析可知,随着无人机高度增加,其误差带来的影响越来越小;在高度 20 m 以上时,0.3 m 的高度误差对最终测量的误差影响小于2%;但随着高度的增加,小目标检测的问题会导致跟踪精度降低。因此,在高度误差小于0.1 m 情况下,可满足大部分场景的测量要求;在高度误差大于0.1 m 情况下,为了降低高度误差对测量精度的影响,建议在大于 20 m 的高度上使用本文方法。

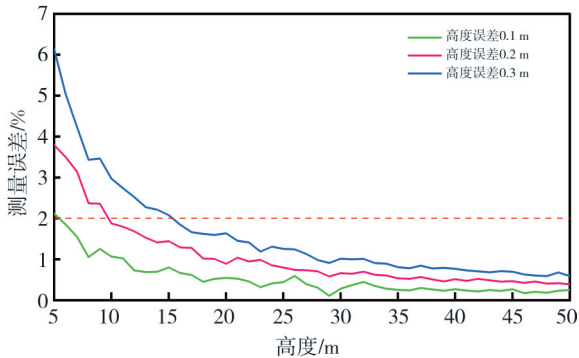


图 10 高度精度分析结果

Fig. 10 High precision analysis results

2.2.3 姿态角误差对测量精度的分析

影响测速精度的姿态角包括俯仰角和翻转角,俯仰角影响目标纵坐标的计算,而翻转角影响横坐标的计算,它们对测量误差的影响是一致的。根据文献[20],经过其改进后静态无人机的航姿求解误差不超过 0.5° ,为保证一定的适用性,本文选定姿态角的误差范围为 1.0° 以内。因此,本文在 30 m 的高度上,以俯仰角为例分析姿态角误差对测量误差的影响。实验在俯仰角为 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的范围内进行,其姿态有 $[0.3^{\circ}, 0.6^{\circ}, 1.0^{\circ}]$ 的误差下进行计算,实验结果

表 2 方法优势分析

Tab. 2 Training parameter

来源	所需先验信息	误差/%	优缺点分析
本文	距目标点高度、相机姿态	2.0	适应不同场景目标,对多目标复杂轨迹均可测量,精度较高。
文献[21]	距目标点高度、相机姿态	1.2	适应不同场景目标,但只能测量直线、单目标。
文献[22]	测速区域	1.8	计算简单,精度高,只适合固定道路段且对相机固定有要求。
文献[23]	车高、相机高度	14.1	对相机的固定及姿态无要求,但只适合单一目标,精度较低。
文献[10]	世界坐标与相机坐标匹配点	0.6	精度高,但是限制单一场景。

综上,本文方法虽然造成了一定的精度下降,但其适应不同场景、不同目标及较复杂的运动轨迹,提升了算法适用性。

2.3 速度测量实验

为验证本文方法的实际可行性,基于公开的军

如图 11 所示,横坐标为相机俯仰角,纵坐标为测量的相对误差,虚线表示测量误差为2%的参考线。从图中分析可知,随着相机俯仰角的减小,其误差带来的影响越来越小。在俯仰角 30° 以下时, 1.0° 的俯仰角误差对最终测量的误差影响小于2%。因此,在俯仰角误差小于 0.3° 情况下,可满足大部分场景的测量要求;在俯仰角误差大于 0.3° 情况下,为了降低姿态角误差对测量精度的影响,建议在姿态角小于 30° 时使用本文方法。

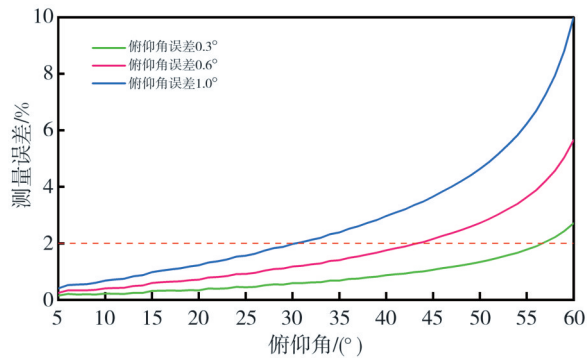


图 11 俯仰角精度分析结果

Fig. 11 Accuracy analysis of attitude angle

2.2.4 与其他方法对比

为了验证本文方法的有效性,将其与现有其他算法作对比。各种方法优缺点分析如表 2,从表中可以看出,文献[21]方法所需先验信息与本文相同,但限制了物体直线运动;文献[22]和文献[10]方法使用场景中的先验信息取得了较高精度,但降低了场景适应性,且对相机固定有所要求;本文方法没有依赖场景尺寸或坐标,但精度有所下降;文献[23]方法使用车高进行估计,忽略了姿态信息导致精度较低。

事视频资料进行实验论证,通过人为假设场景计算运动目标的移动速度。测量结果如图 12 所示,可以看出,本文方法能够有效测量运输车辆、快速移动的坦克、正在开炮的坦克等军事目标的速度。

实验证明了本文方法满足相关测量技术要求,在未来战场信息收集具有重要的应用潜力。

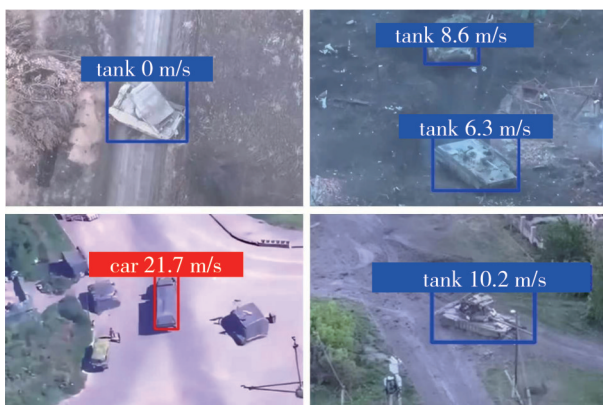


图 12 军事目标测速实验结果图

Fig. 12 Military target speed measurement experiment

3 结 论

针对现有单目速度估计方法对场景尺寸或目标尺寸先验信息的强依赖问题,本文提出了一种基于无人机视角的地面多军事目标速度估计新方法。使用YOLOv11实现对测速目标的跟踪,得到其像素坐标轨迹;然后,使用高度和无人机的姿态建立几何模型,计算物体三维世界中移动的距离;最后,给出计算物体速度的求解公式,实现了不依赖场景先验信息的速度估计,提高了场景和对象适应性。

实验结果表明,本文方法在不依赖场景先验信息的情况下,实现了高精度的速度估计,显著提升了本文方法的场景适应性与目标普适性。该多目标跟踪算法的帧率为32.75 帧/s,满足实时测速需求;所提几何模型在高空大于20 m的高度且姿态角小于 30° 时,测量相对误差不超过2%,达到了较高的精度水平,能够有效支持实际应用中的测速需求。

然而,本文工作还存在一些不足,对于计算速度时的步长 k 只给出了简单的阈值搜索算法,未来将使用优化算法来寻找更优的 k 值选择策略。对于精度分析部分只进行了高度和姿态角的分析,未来将引入相机内参、无人机扰动和路径优化等因素的敏感性分析,增强工程落地价值。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] 徐天旭,莫熙龙,郁炜. 论无人机在未来军事作战中

的潜力[J]. 中国军转民, 2025(2): 37-38.

XU Tianxu, MO Xilong, YU Wei. On the potential of UAVs in future military operations [J]. Defence Industry Conversion in China, 2025(2): 37-38. (in Chinese)

[2] 高越,杜文略,李红薇,等. 基于多目立体视觉的试件飞行运动速度测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(3): 68-71.

GAO Yue, DU Wenlue, LI Hongwei, et al. Measurement method for specimen fly speed based on multi-camera stereo vision technique[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(3): 68-71. (in Chinese)

[3] 张晓玲,罗印升,张宝峰. 基于双目立体视觉测量原理的物体运动速度测量[J]. 光电子·激光, 2016, 27(9): 935-940.

ZHANG Xiaoling, LUO Yinsheng, ZHANG Baofeng. Measurement on velocity of dynamic object in long distance based on binocular vision system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(9): 935-940. (in Chinese)

[4] 张小苗,曹勇,于起峰. 基于双目视觉的返回舱着陆横向速度测量[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 1-5.

ZHANG Xiaomiao, CAO Yong, YU Qifeng. Horizontal landing velocity measurement of return cabin based on binocular vision[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(3): 1-5. (in Chinese)

[5] 张哲铭,高路,唐侃,等. 基于双目立体视觉的火箭分离速度测量[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会优秀论文集, 2020: 118-129.

[6] 常子霆,施雨晴,王俊,等. 基于双目视觉的车辆速度测量方法[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 135-139.

CHANG Ziting, SHI Yuqing, WANG Jun, et al. Vehicle speed measurement method based on binocular vision [J]. Computer Science, 2021, 48(9): 135-139. (in Chinese)

[7] 鱼朋波. 高速公路机器视觉测速方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.

[8] KE R, KIM S, LI Z, et al. Motion-vector clustering for traffic speed detection from UAV video[C]//2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), 2015: 1-5.

[9] LONG H, CHUNG Y N, LI J D. Automatic vehicle speed estimation method for unmanned aerial vehicle images[J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2018, 9(2): 442-451.

- [10] 梁建术, 贾汇沅, 张琳琳. 基于监控视频图像车辆测速的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(6): 87-89.
LIANG Jianshu, JIA Huilun, ZHANG Linlin. Research on algorithm of traffic accident vehicle speed based on monitoring video image [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(6): 87-89. (in Chinese)
- [11] BISWAS D, SU H, WANG C, et al. Speed estimation of multiple moving objects from a moving UAV platform [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(6): 259.
- [12] 陈彬, 刘华洲, 李勃铨, 等. 基于YOLOv5算法的无人机巡检图像中绝缘子单目测距方法[J]. 无线电工程, 2024, 54(6): 1421-1430.
CHEN Bin, LIU Huazhou, LI Bocheng, et al. Monocular distance measurement method for insulator in unmanned aerial vehicle inspection images based on YOLOv5 algorithm [J]. Radio Engineering, 2024, 54(6): 1421-1430. (in Chinese)
- [13] 邢书浩, 邓杰, 胡哲, 等. 一种基于无人机航拍图像的船舶航行速度测量方法[J]. 数字通信世界, 2023(3): 100-102.
XING Shuhao, DENG Jie, HU Zhe, et al. A method for measuring ship's sailing speed based on uav aerial images [J]. Digital Communication World, 2023(3): 100-102. (in Chinese)
- [14] LI J, CHEN S, ZHANG F, et al. An adaptive framework for multi-vehicle ground speed estimation in airborne videos [J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1241.
- [15] DA SILVA BASTOS M E, FREITAS V Y F, DE MENEZES R S T, et al. Vehicle speed detection and safety distance estimation using aerial images of Brazilian highways [C]//Anais do Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH 2020), 2020: 258-268.
- [16] 付燕, 窦晓熠, 叶鸥. 基于YOLO的井下人员速度测量方法研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(2): 160-165.
FU Yan, DOU Xiaoyi, YE Ou. A measurement method of underground workers speed based on YOLO [J]. Coal Engineering, 2022, 54(2): 160-165. (in Chinese)
- [17] 周赛奥. 基于高速图像的高精度运动速度测量方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [18] CHEN F, WANG X, ZHAO Y, et al. Visual object tracking: a survey [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2022, 222: 103508.
- [19] ZHANG Y, SUN P, JIANG Y, et al. ByteTrack: multi-object tracking by associating every detection box [J/OL]. [2025-03-18]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.15334>.
- [20] 赵嘉梁, 李世中, 赵紫良. 基于扩展卡尔曼滤波的无人机航姿算法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 305-310.
ZHAO Jialiang, LI Shizhong, ZHAO Ziliang. UAV attitude and heading algorithm based on extended Kalman filter [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 305-310. (in Chinese)
- [21] 郑锴, 郑献民, 殷少锋, 等. 基于最小二乘拟合的无人机运动目标测速方法[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 61-64.
ZHENG Kai, ZHENG Xianmin, YIN Shaofeng, et al. A UAV velocity measurement approach for moving targets based on least squares fitting algorithm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(3): 61-64. (in Chinese)
- [22] 陈祎楠. 基于无人机视频的车辆轨迹跟踪及超速检测算法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- [23] 袁鹏. 基于视频数据的车辆车速检测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.