

# 无人机视觉地理定位研究综述

朱得糠, 李东泽, 郭鸿博, 李彤

(军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071)

**摘要:**近年来, 无人机在控制稳定性、传感器精度和载荷智能化等方面进步显著, 被普遍应用于情报侦察、打击引导、安防巡逻、应急救援、森林巡检等军事和民用领域。无人机及其载荷主要承担发现和定位目标的任务, 利用相机对地面目标地理定位(简称对地视觉定位)是最为普及的低成本手段, 属于航空摄影测量技术分支。基于深度学习的计算机视觉浪潮促进了各类无人系统视觉感知能力的智能化发展, 对于搭载光电载荷的无人机而言, 对地目标智能识别和定位是重要的能力增长点。鉴于此, 系统总结了无人机对地视觉定位技术的研究现状, 全面细致地探究了定位过程涉及各类坐标系定义与相互转换关系, 指出了关键原理问题和技术途径。无人机视觉地理定位可分为单机定位和多机协同定位两种方式, 主要通过基于辅助地理信息的定位、已知目标距离的定位、三角定位和纯角度滤波定位四种途径实现。同时, 预测了未来无人机视觉地理定位技术的研究趋势, 力求为无人机系统智能化发展提供支撑。

**关键词:** 无人机; 视觉; 地理定位; 滤波; 协同

**中图分类号:** V279

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5558(2023)01-02180

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-5558.2023.03.004

## A Review of Vision-based Geolocation Using UAVs

ZHU De-kang, LI Dong-ze, GUO Hong-bo, LI Tong

(National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Science, Beijing 100071)

**Abstract:** In recent years, UAVs have made remarkable progress in control stability, sensor accuracy and payload intelligence. Meanwhile, they are widely used in military and civilian fields such as intelligence reconnaissance, strike guidance, security patrols, emergency rescue and forest inspections. UAVs and their payloads are mainly used to detect and locate targets. Specifically, using cameras(vision) to locate ground targets(visual geolocation for short) is the most popular low-cost method, which belongs to the branch of aerial photogrammetry technology. The wave of computer vision based on deep learning has promoted the intelligent development of visual perception capabilities for various unmanned systems. For UAVs equipped with optoelectronic payloads, intelligent identification and geolocation of ground targets is an important growth point in their capabilities. In view of this, the research status of visual geolocation using UAVs is systematically summarized in this paper, the definition and transformation of involved coordinate frames is explored in detail, the key principles and technical approaches are pointed out. Vision-based geolocation using only one UAV or multiple UAVs are two different approaches, and the main technologies are geolocation based on auxiliary information, geolocation with known target distance, triangulation and pure angle filtering method. At the same time, the research trend of future UAVs visual geolocation technology is predicted, striving to provide support for the intelligent development of UAVs.

收稿日期: 2022-10-20

**Key words:** unmanned aerial vehicle(UAV); vision; geolocation; filtering; collaboration

## 0 引言

无人机具备低成本、高精度以及便捷飞行等优点,近年来发展迅速,特别是搭载光电载荷(可见光/红外相机)的无人机,被广泛应用于航空摄影测量与遥感<sup>[1-2]</sup>任务中,为地理信息系统(Geographic Information System, GIS)提供基础数据<sup>[3]</sup>,如绘制地形图。无人机对地视觉定位任务模式不同于 GIS 应用,但其主要视觉处理原理与航空摄影测量一致,属于航空摄影测量的一个分支,该技术在军事领域的研究和应用由来已久<sup>[4]</sup>,为侦察和引导打击提供情报支持。随着无人机在民用领域的普及,其应用也日益广泛,如抢险救灾人员搜救、警用巡逻、森林植保防范火情等。

机载相机遵循小孔成像原理,将三维空间目标投影到二维图像的过程中丢失了一个维度(深度)信息,单个观测图像仅提供了目标的方向角度测量,据此无法定位目标。目前主要通过以下两种类型的方法解决上述问题:一是补充额外信息的方法,引入补充信息解算深度值从而确定目标位置;二是统计估计方法,从多角度观测的方向测量值中利用优化或滤波等方法估计目标位置。补充额外信息方法的核心是利用相机的内外参数进行齐次坐标转换,通过相机标定获得内参数,从相应传感器读取外参数,如从全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)读取无人机位置,从航姿参考系统(Attitude and Heading Reference System, AHRS)读取无人机偏航/俯仰/滚转角等。统计估计方法基于回归和优化对静止目标进行三角定位;基于滤波估计定位运动目标,原理上与纯角度跟踪(Bearing Only Tracking, BOT)一致。虽然补充额外信息的许多算法也利用多次测量和统计方法提高定位精度,但它们不是纯角度测量值的位置估计问题,本文仍然把它们归为前者。

目前,成熟的对地视觉定位手段是:观察员从无人机回传的视频图像上人工识别并框选目标位置,图像处理算法锁定或跟踪目标,提供目标的图像位置测量值给定位算法。识别框选目标主

要由人工操作,通常一次定位单个目标已经难以满足军事和民用需求,特别是军用方面,智能化战争时代正在加速到来,战场的动态性和复杂性日益加强,对多目标的快速识别和定位能力提出了迫切需求。

深度学习引领的人工智能高潮首先在计算机视觉领域取得了巨大突破,目标检测识别性能在某些方面已经达到甚至超过了人类的水平,出现了一批高效实用的算法,如 Faster RCNN<sup>[5]</sup>系列、YOLO<sup>[6]</sup>系列等。算法引入航空遥感图像处理领域,能够替代观察员快速准确地在图像上识别框选多个目标。目标检测能力的提升也提高了多目标跟踪性能,典型的算法如 DeepSort<sup>[7]</sup>与 YOLO 算法相结合,成为工程应用中的流行算法。以上智能算法作用在图像域,与无人机控制技术相结合提升无人机系统在空间域的智能化程度,如自动跟踪飞行、自主打击引导等,都需要以空间域目标定位技术为中介。因此,结合最新的人工智能计算机视觉技术拓展对地定位能力,是无人机系统智能化升级的重要途径。

在军事领域,无人机蜂群作战是近年的一个热门研究方向。大量低成本无人机组成蜂群协同作战,可以代替单个多功能无人机执行侦察监视、区域拒止等任务。蜂群无人机协同目标探测,具备感知范围大、重访周期短、多角度同时观测等优势,通过信息融合可获得更高的识别准确率和定位精度。多机协同探测的一个重要研究内容就是数据关联,尤其是多目标检测和跟踪任务,目标视觉特征和空间位置信息相耦合,不同来源的数据关联时既要考虑视觉特征的相似性又要考虑空间位置的远近程度。此应用场景为对地视觉定位提供了新的研究内容。

鉴于以上所述视觉定位技术的新要求和新思路,非常有必要及时梳理总结其关键技术和研究现状,以加速无人机的智能化发展。本文系统总结了该领域近二十年的研究工作,首先详细描述了对地视觉定位过程中各种坐标系的定义和相互转换关系,从数学原理上指明问题的关键所在;其次全面梳理了单架无人机对地视觉定位研究现

状,按技术手段分为基于辅助地理信息、基于某一维距离、三角定位和纯角度跟踪滤波等四类方式;然后整理了多架无人机协同定位的研究现状;最后预测了无人机对地视觉定位的未来发展趋势。

## 1 对地视觉定位坐标关系

无人机对地视觉定位任务涉及多个坐标系,许多文献为了简化算法描述,没有全部用到,或者忽略安装位置偏差等,简化了坐标之间的转换计算。本文从工程实践的角度出发,将定位任务定义在常见的大地坐标系下,由机载光学相机图像域中的目标位置求解大地坐标,基于此全面细致描述了全部涉及的坐标系,并给出相互转换计算方法。

### 1.1 坐标系定义

无人机对地定位需要利用无人机的空间位姿,涉及坐标系较多,包括世界大地坐标系(World Geodetic System 1984, WGS84)、机载参考系、机体系、相机系、云台系和图像系,下面分别展开描述。

#### (1) 世界大地坐标系

因 GNSS 广泛采用 WGS84 世界大地坐标系,故而使其成为无人机导航领域广泛采用的地心坐标系——即原点与地球质心重合、固定在地球上与地球一起旋转的坐标系。WGS84 有空间直角坐标和大地坐标两种等价表示形式,它采用十分近似于地球自然形状的参考椭球作为描述和推算地面点位置和相互关系的基准面。两种形式的坐标定义如下:

1) 空间直角坐标系是一种地心地固坐标系(Earth-centered Earth-fixed, ECEF),也称为地球坐标系,简记为  $e$  系。 $Z$  轴指向 BIH(1984.0) 定义的地极(CTP)方向, $X$  轴指向 BIH 定义的零度子午面和 CTP 赤道的交点, $Y$  轴垂直于  $XOZ$  平面构成右手坐标系,记为  $O_e-X_eY_eZ_e$ ,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

2) 大地坐标系是 GNSS 定位数据采用的坐标系,坐标  $(B, L, H)$  分别表示大地纬度  $B$ 、经度  $L$  和高程  $H$ 。纬度是空间点与参考椭球面的法线与 CTP 赤道面的夹角,经度是空间点与参考椭球的自转轴所在的面与 BIH 定义的零度子午面的夹角,

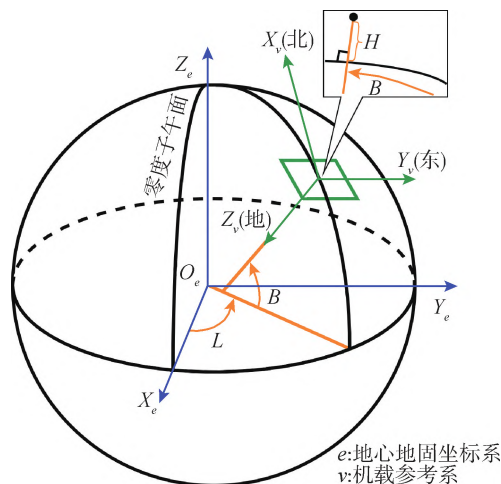


图1 WGS84 坐标系

Fig. 1 Schematic diagram of WGS84 coordinate system

大地高程是空间点沿着参考椭球的法线方向到参考椭球面的距离,具体如图 1 所示。

#### (2) 机载参考系

以无人机质心为原点的北东地(North-East-Down, NED)坐标系依据 WGS84 椭球模型定义, $X$  轴指向北极(即正北方向), $Y$  轴指向正东方向, $Z$  轴垂直于  $O_v-XY$  平面向下指向地面,记为  $O_v-X_vY_vZ_v$ ,如图 2(a) 所示。

#### (3) 机体系

原点取在无人机质心处,坐标系与飞机固连, $X$  轴在无人机对称平面内平行于机体轴线指向机头, $Y$  轴垂直于无人机的对称平面指向机身右方, $Z$  轴在无人机对称平面内与轴垂直并指向机身下方,记为  $O_b-X_bY_bZ_b$ ,如图 2(b) 所示。

#### (4) 相机系

相机系也叫视线坐标系,原点为相机的光心, $Z$  轴指向相机视线方向(前方),根据小孔成像几何关系, $X$  轴与像平面水平轴在三维空间方向平行指向右, $Y$  轴与平面竖直轴在三维空间方向平行指向下,记为  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,如图 2(b) 所示。

#### (5) 图像系

即像素坐标系,原点是二维矩形图像左上角点, $X$  轴为图像上边沿指向右, $Y$  轴为图像左边沿指向下,记为  $O_u-X_uY_u$ 。注意,像平面位于小孔成像几何关系确定的三维空间位置处,如图 2(b) 所示。

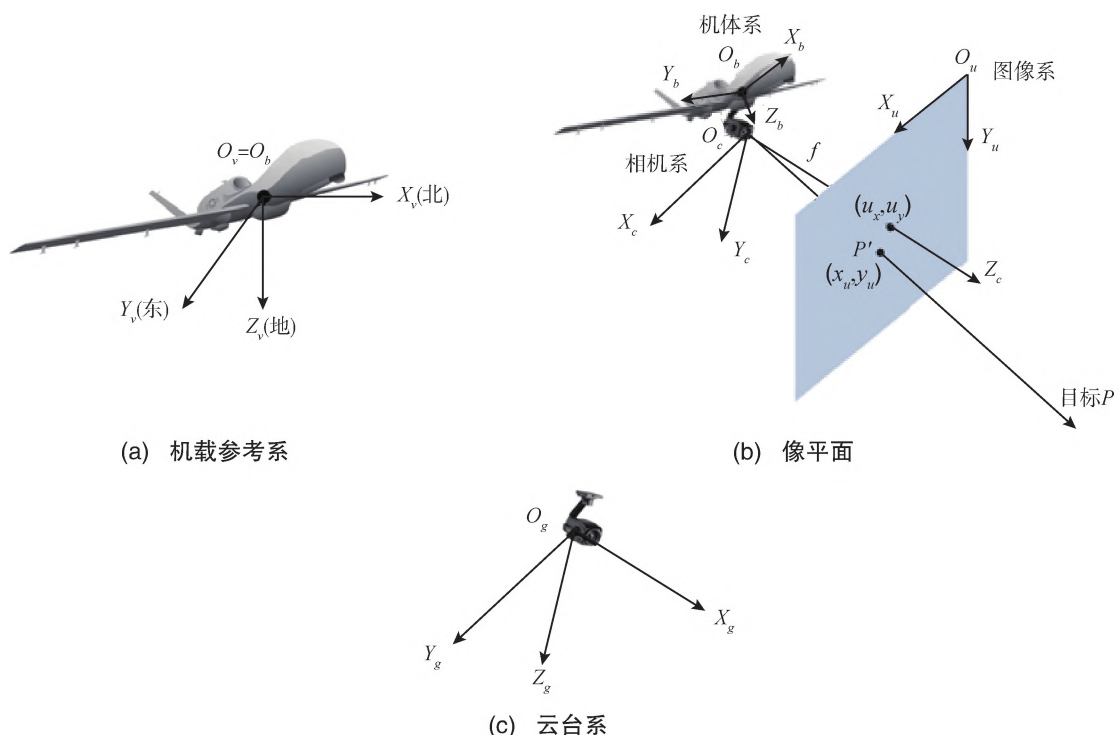


图 2 无人机视觉定位相关坐标系

Fig. 2 Coordinate system related to UAV visual geolocation

### (6) 云台系

相机固连在云台上随之转动，云台旋转中心即为原点， $X$  轴一般与相机系  $Z_c$  轴平行同向， $Y$  轴与相机系  $X_c$  轴平行指向右， $Z$  轴与相机系  $Y_c$  轴平行指向下，记为  $O_g-X_g Y_g Z_g$ ，如图 2(c) 所示。

云台系与相机系的区别有两方面：一是严格考究，二者的原点不一定是重合的；二是相机系和云台系一般分别出现在几何光学和控制领域，二者的  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴选取遵从各自惯用定义。

### 1.2 坐标转换关系

已知目标在无人机航拍图像上的投影点坐标  $(x_u^p, y_u^p)$ 、相机内参数  $K$  及焦距  $f$ 、无人机在 WGS84 坐标系的位置  $(B^{uav}, L^{uav}, H^{uav})$ 、无人机姿态角、相机相对机体的姿态角和位置，定位任务的目的是求解目标点的大地坐标  $(B^p, L^p, H^p)$ 。

目标坐标由图像系转换到经纬高坐标系的过程如图 3 所示。其中， $(x_u^p, y_u^p) \rightarrow (x_c^p, y_c^p, z_c^p)$  依据小孔成像几何原理，由投影点在图像系的二维坐标计算目标点在相机系的三维坐标，是两个空间位置点的坐标解算，随后的过程均是对目标点在不同系的坐标转换。除  $e$  系和大地系外，其它转

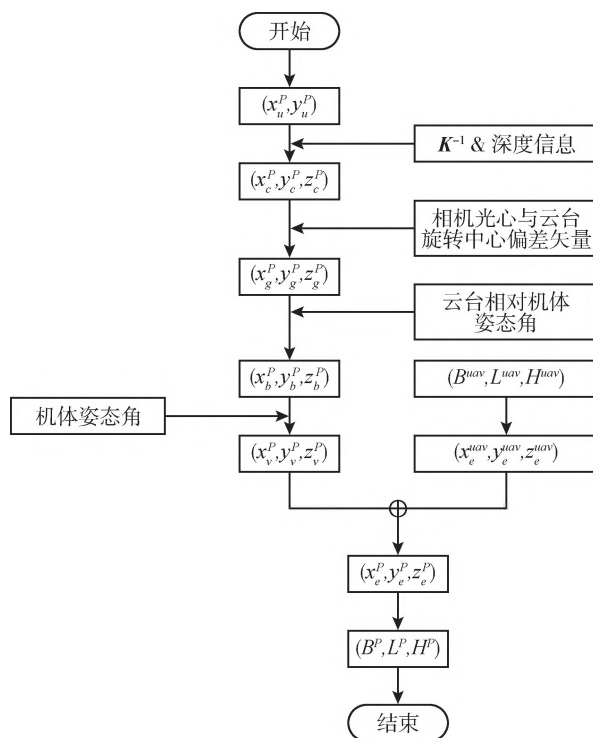


图 3 坐标转换定位流程图

Fig. 3 Flowchart of coordinate transformation geolocation

换都发生在空间直角坐标系之间，本文采用齐次坐标转换的方式。对转换矩阵求逆可获得反方向



的转换矩阵, 本文不再赘述。

#### (1) 目标在 $c$ 系的坐标解算

小孔成像空间定位关系如图4所示, 设目标点  $P$  在图像上的投影点为  $P'$ 。在  $c$  系中, 设  $P$  的坐标为  $(x_c^P, y_c^P, z_c^P)$ ,  $P'$  的坐标为  $(x_c^{P'}, y_c^{P'}, f)$ ; 在  $u$  系中, 设  $P'$  的坐标为  $(x_u^{P'}, y_u^{P'})$ 。  $u$  系向  $c$  系转换是把二维图像系坐标转换为三维相机系坐标, 将图像坐标在末尾添加 1 表示为齐次坐标, 即  $(x_u^{P'}, y_u^{P'}, 1)$ , 则其对应的相机系坐标  $(x_c^P, y_c^P, z_c^P)$  按如下公式计算

$$\frac{1}{z_c^P} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & u_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c^P \\ y_c^P \\ z_c^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u^{P'} \\ y_u^{P'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

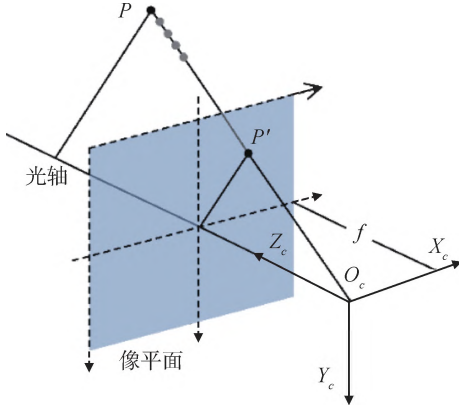


图4 单目视觉几何关系

Fig. 4 Geometry of monocular vision

从代数的角度, 式(1)可看作是三个未知数  $x_c^P$ 、 $y_c^P$ 、 $z_c^P$  组成的两个方程, 求解该方程组缺少一个约束方程。已知内参数  $K$ 、 $(x_u^{P'}, y_u^{P'})$  和相机焦距  $f$ , 可求解出  $(x_c^{P'}, y_c^{P'}, f)$ 。从几何角度看, 如图4所示,  $P$ 、 $P'$  和原点  $O_c$  三点共线,  $P$  点可以是  $O_c P'$  连线上任意一点, 即

$$(x_c^P, y_c^P, z_c^P) = \lambda (x_c^{P'}, y_c^{P'}, f) \quad \lambda > 0 \quad (2)$$

要唯一确定  $P$ , 需要确定  $\lambda$  的值。

无论从代数或几何的角度看, 由图像系坐标求解相机系坐标均需要提供目标位置的一个额外信息(约束方程), 即投影过程中丢失的深度信息,

$$R_g^b = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

这正是单目视觉定位的难点所在。通常的解决思路是额外估计  $z_c^P$  或光心与目标连线的距离  $O_c P$  的长度, 或对静止目标采用三角定位的方法(即增加约束方程求解)。

式(1)可变形为

$$\begin{bmatrix} x_c^P \\ y_c^P \\ z_c^P \end{bmatrix} = z_c^P \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{f_x} & 0 & -\frac{u_x}{f_x} \\ 0 & \frac{1}{f_y} & -\frac{u_y}{f_y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{K^{-1}} \begin{bmatrix} x_u^{P'} \\ y_u^{P'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

容易看出, 当目标在相机视场中心, 即  $x_u^{P'} = u_x$ 、 $y_u^{P'} = u_y$  时, 不论  $K$  的值是多少,  $(x_c^P, y_c^P, z_c^P) \equiv (0, 0, z_c^P)$ , 式(3)恒成立。此时, 可以省略相机标定的环节, 由  $z_c^P$  唯一确定目标的位置, 这就是变焦镜头吊舱普遍采用的目标定位方式。

#### (2) $c$ 系向 $g$ 系转换

从该步开始, 采用齐次坐标转换的方法处理目标点位置在多个空间直角坐标系之间的转换, 将三维坐标扩展到四维, 即从  $(x_c^P, y_c^P, z_c^P, 1)$  开始。  $c$  系向  $g$  系转换的旋转矩阵为  $R_c^g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,

令  $d_c^g$  为在  $g$  系中云台质心指向光心的三维列矢量, 一般情况下吊舱都是令二者重合, 偏差忽略不计, 即令  $d_c^g = \mathbf{O}$ ,  $\mathbf{O}$  为三维全零列矢量。则  $c$  系向  $g$  系的齐次转换为

$$\begin{bmatrix} x_g^P \\ y_g^P \\ z_g^P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c^g & d_c^g \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c^P \\ y_c^P \\ z_c^P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### (3) $g$ 系向 $b$ 系转换

云台相对于无人机的姿态角为  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , 偏航角  $\alpha$  为云台  $X_g$  轴在  $b$  系  $X_b O_b Y_b$  平面内投影与  $X_b$  轴的夹角, 右偏为正; 俯仰角  $\beta$  为云台  $X_g$  轴与  $X_b O_b Y_b$  平面之间的夹角, 抬头为正; 滚转角  $\gamma$  为  $g$  系  $X_g O_g Z_g$  平面与无人机对称平面之间的夹角, 右滚为正。  $g$  系向  $b$  系转换的旋转矩阵为

注意,若云台只有偏航和俯仰两个维度可调,则式(5)中去掉等号右边关于 $\gamma$ 角的乘项即可。 $\mathbf{d}_g^b$ 为***b***系中无人机质心到云台质心的三维列矢量,则齐次转换矩阵 $\mathbf{T}_g^b$ 为

$$\mathbf{T}_g^b = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_g^b & \mathbf{d}_g^b \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

齐次坐标转换具有和式(4)相同的形式,这里不再重复列出。

$$\mathbf{R}_b^v = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

两个坐标系的原点都是无人机质心,所以没有平移矢量,则

$$\mathbf{T}_b^v = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^v & \mathbf{O} \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### (5) *v* 系向 *e* 系转换

由文献[9]可知,*v*系向*e*系转换的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_v^e = \begin{bmatrix} -\cos L^{uav} \sin B^{uav} & -\sin L^{uav} & -\cos L^{uav} \cos B^{uav} \\ -\sin L^{uav} \sin B^{uav} & \cos L^{uav} & -\sin L^{uav} \cos B^{uav} \\ \cos B^{uav} & 0 & -\sin B^{uav} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{d}_v^e$ 为*e*系中地心到无人机质心的三维列矢量,也就是无人机 GNSS 坐标转化成*e*系中的坐标矢量,则齐次转换矩阵 $\mathbf{T}_v^e$ 为

$$\mathbf{T}_v^e = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_v^e & \mathbf{d}_v^e \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

#### (6) *e* 系与大地系之间的转换

在*v*系向*e*系转换中需要将无人机 GNSS 位置(大地系下的坐标)转换到*e*系中得到 $\mathbf{d}_v^e$ ,根据文献[10],转换方法如下

$$\begin{cases} x_e^{uav} = (N + H^{uav}) \cos B^{uav} \cos L^{uav} \\ y_e^{uav} = (N + H^{uav}) \cos B^{uav} \sin L^{uav} \\ z_e^{uav} = [N(1 - e^2) + H^{uav}] \sin B^{uav} \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L^{uav}}} \end{cases} \quad (12)$$

最终,目标在*e*系下的坐标按如下方法转换为大地系坐标

#### (4) *b* 系向 *v* 系转换

无人机姿态角表示为 $(\phi, \theta, \psi)$ ,偏航角 $\phi$ 为机体轴在*v*系 $X_v O_v Y_v$ (水平)面上的投影与 $X_v$ 轴之间的夹角,右偏为正;俯仰角 $\theta$ 为机体轴与 $X_v O_v Y_v$ 面之间的夹角,抬头为正;滚转角 $\psi$ 为无人机对称平面与通过机体轴的铅垂平面间的夹角,右滚为正。*b*系向*v*系转换的旋转矩阵为

$$\begin{cases} L^P = \arctan \frac{y_e^P}{x_e^P} \\ B^P = \arctan \frac{z_e^P}{[1 - N'e^2(N' + H^P)] \sqrt{(x_e^P)^2 + (y_e^P)^2}} \\ H^P = \frac{\sqrt{(x_e^P)^2 + (y_e^P)^2}}{\cos B^P} - N' \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, $N' = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L^P}}$ 。注意到以上求

解公式中, $B^P$ 和 $H^P$ 是耦合的,可以用数值迭代的方法计算,常用 Newton-Raphson 方法。

## 2 单机对地视觉定位关键技术与研究现状

单架无人机挂载光电载荷对地视觉定位是目前的主流方式,也是多架无人机协同的技术基础,相关研究较多。目前的主要方法可分为四种类型,分别是基于辅助地理信息的定位、已知目标距离的定位、三角定位和纯角度滤波定位。按前文对技术手段的粗分类,这里的前两类属于基于补充额外信息的定位,后两类属于对多个角度观测数据采用统计方法估计位置的定位。

### 2.1 基于辅助地理信息的定位

常用于辅助视觉定位的地理信息数据是数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)<sup>[11]</sup>。DEM是地形表面形态的数字化表示,是将地面划分为网格,用网格坐标 $(x, y, z)$ 表示实体地面模型,其中的 $z$ 表示高程数据。DSM是在DEM基础上进一步包括

了地面上所有固定物体, 如建筑、森林、桥梁等在内的高程模型, 通常 DSM 可与正射影像结合, 也就包含了图像特征信息。

基于辅助地理信息的对地视觉定位思路为: 求目标在图像上的点与光心连线和 DEM/DSM 模型交点的坐标。因为相机的内外参数均已知, 即可确定连线方向, 因而可以求解交点。定位原理示

意图如图 5(a) 所示<sup>[12]</sup>; 求解交点通常是利用迭代计算直至收敛的方法, 迭代计算过程与利用割线法对连续函数求根一致, 如图 5(b) 所示<sup>[13]</sup>。联系 1.2 节  $c$  系的坐标解算容易看出, 该类方法从几何角度理解很直观, 求解线和面的交点; 从代数角度看, 相当于增加了一个约束方程。采用该方法定位的工作包括文献[13] ~ 文献[18] 等。

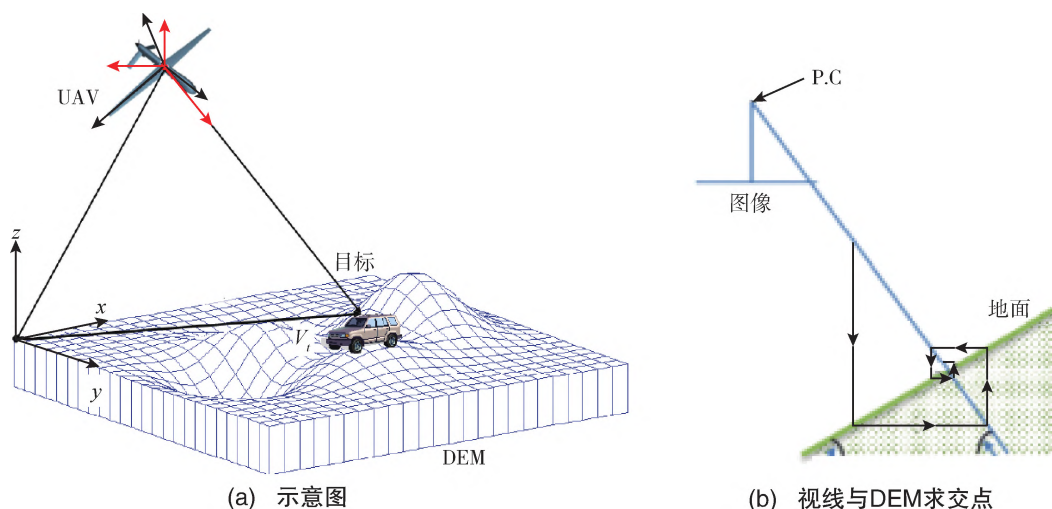


图5 基于 DEM 的定位

Fig. 5 Schematic diagram of geolocation based on DEM

部分算法利用 DSM 校正后的图像特征进行定位。文献[13]、文献[19] ~ 文献[21] 对无人机实拍图像提取 SIFT 特征、SURF 特征或 CNN 特征, 与参考图片的特征进行匹配, 根据匹配点几何约束修正无人机导航参数再解算目标点位置, 或者直接在参考图上匹配定位目标。文献[22] 提取实拍图像特征与 DSM 正射影像特征匹配, 计算单应(Homography)矩阵, 将目标映射到参考图像上, 直接提取经纬高。文献[23] 用 Sobel 算子提取参考图线特征保存于无人机中, 与相机拍摄的图像经过相同处理后配准, 即可得到目标位置, 该方法假设地面是水平的, 并且通过气压测高仪获得无人机和地面的相对高度。文献[24] 对无人机视觉导航定位中的配准定位算法有详细总结, 该类方法主要用来确定无人机自身的位置, 用于定位目标的研究比较少, 不是对地视觉定位的主流方法。

基于地理信息支持的定位方法优点是基于一次观测即可对静止或运动目标定位, DSM 模型的图像特征信息还可以用于改进定位精度, 缺点则

是先验地理信息数据通常难以获得。

## 2.2 已知目标距离的定位

由 1.2 节  $c$  系的坐标解算可知, 若是能给出成像时丢失的某一个维度的深度信息, 则可以直接计算得到目标位置, 这是实践中运用最为广泛的一类方法。这类方法原理上相当于增加了一个目标三维坐标的约束方程, 结合式(1) 由图像坐标系反解到相机系, 再经过一系列坐标系转换求得参考系下的坐标值。相关研究算法非常多, 对坐标系的定义不同, 具体求解公式不同, 但思想是一致的。下面依据本文设定的坐标系, 给出原理性公式描述, 并梳理主要方法。常用的补充距离信息包括以下三种:

### (1) 已知目标海拔高度

这类方法通常假设目标区域地面平坦, 则可用测量区域内某个参考点的高度值近似目标高度, 参考点的高度可以通过 GNSS 测量或者 DEM 查询获得。无人机海拔高度由 GNSS 实时可查, 所以等效于已知目标与无人机之间的高度差, 用  $h$  表示。

也可以直接获得高度差,例如通过气压计测量大气压强差再转化为高度差。其中,文献[25]、文献[26]不需要从无人机状态传感器来测量高度差,而是通过立体视觉的方法估计高度差。

由式(1)可知,解算目标在相机系中的坐标需要已知  $z_c^P$ ,根据目标视线方向、视场中心方向和高度差  $h$  可解算出  $z_c^P$ ,从而得到目标在  $c$  系中的三维坐标,再通过一系列坐标转换,得到  $e$  系表示的目标位置坐标。通常将目标锁定在视场中心,则  $z_c^P$  就等于目标的斜距,也就是目标与相机之间的距离,如图 6 所示<sup>[27]</sup>。

$$(x_e^P, y_e^P, z_e^P, 1) = T_v^c T_b^v T_g^h T_c^g g(x_u^P, y_u^P, h) \quad (14)$$

式(14)中,  $g(x_u^P, y_u^P, h) = (x_c^P, y_c^P, z_c^P, 1)$  表示计算  $P$  点  $c$  系坐标的函数。

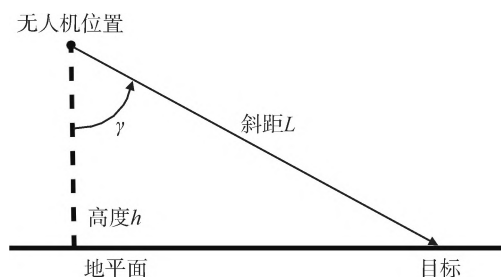


图 6 已知相对高度的定位

Fig. 6 Schematic diagram of geolocation based on relative height known

文献[28]~文献[32]均采用此类方法,此类方法优点是只需一次测量即可确定目标位置,适用于运动和静止目标,缺点是精度不高。更进一步的研究采用多次测量的统计估计方法,对于静止目标,通常采用回归分析、最小二乘等方法,对于运动目标,则建立运动状态方程和测量方程,采用 Kalman 滤波等方法进行估计。对静止目标的多次测量通过统计估计的方法定位,基本思想就是建立如式(14)等号右边所示的多个测量方程,利用统计方法求解最优三维位置坐标。如文献[33]~文献[35]采用迭代最小二乘(Recursive Least Squares, RLS)、误差滤波、Monte Carlo 等方法减小误差;文献[36]、文献[37]采用回归分析的方法在定位的同时估计方位角偏差,提高估计精度,同时考虑无人机航迹优化,提高测量精度;文献[24]、文献[27]、文献[38]、文献[39]用扩展 Kal-

man 滤波(EKF)提高估计精度,同时提出规划路径和云台控制等提高精度的方法;文献[40]、文献[41]采用容积 Kalman 滤波(CKF)算法进行估计;相似的工作还包括文献[42]~文献[46],上述算法都是补充海拔高度测量值的统计方法。

## (2) 已知目标斜距

随着无人机载荷技术的进步,越来越多光电吊舱具备主动激光测距能力,可以直接测量目标到光电吊舱的精确斜距。激光测距指向和视场中心同向,因此斜距就等于  $z_c^P$ ,可代入式(1)中解算目标位置,这种方式不需要额外测量目标高程,不需要假设地面平坦。文献[8]、文献[47]、文献[48]均是通过激光测距获得斜距,并进一步解算或滤波估计目标位置。

## (3) 已知目标尺寸

在某些情况下,已知目标某一个维度的绝对尺寸,通过图像处理的方法能够计算得到无人机与目标之间的相对高度,从而按照前面所述已知高度差的方式定位目标。如文献[49]提出的定位方法,已知目标(车)的长度,在其处于水平状态时,通过测量车头、车尾之间的像素距离,可求解出目标相对于无人机的高度差,从而再利用文献[33]中的算法对目标进行定位,如图 7(a)所示。图 7(b)为其几何原理,已知  $PQ$  尺寸,则根据  $\Delta GHP$ 、 $\Delta GHQ$  和  $\Delta GPQ$  的关系,可以求解出  $GH$  的长度。

## 2.3 三角定位

三角定位利用目标的两个或多个不同方向角测量值来计算目标位置,原理是目标与两个测量点构成三角形。已知两参考点的坐标以及参考点与目标点连线方向矢量,则可以唯一确定目标点坐标,如图 8(a)所示<sup>[50]</sup>。实际应用中,由于无人机和目标相距较远且各类误差叠加,两个参考点处测量值估计的定位误差较大,通常对多次测量进行滤波或非线性优化求解以减小定位误差,如图 8(b)所示<sup>[50]</sup>。文献[50]、文献[51]采用非线性 Kalman 滤波的方法估计最优位置,文献[52]采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化的方法求位置最优解。采用该方式定位的无人机通常绕目标点进行盘旋飞行,多次观测,最优路径规划也是一个重要研究点。对于单个无人机单相机而言,该方法



只能定位静止目标, 因为需要无人机运动到不同位置对同一点进行观测。

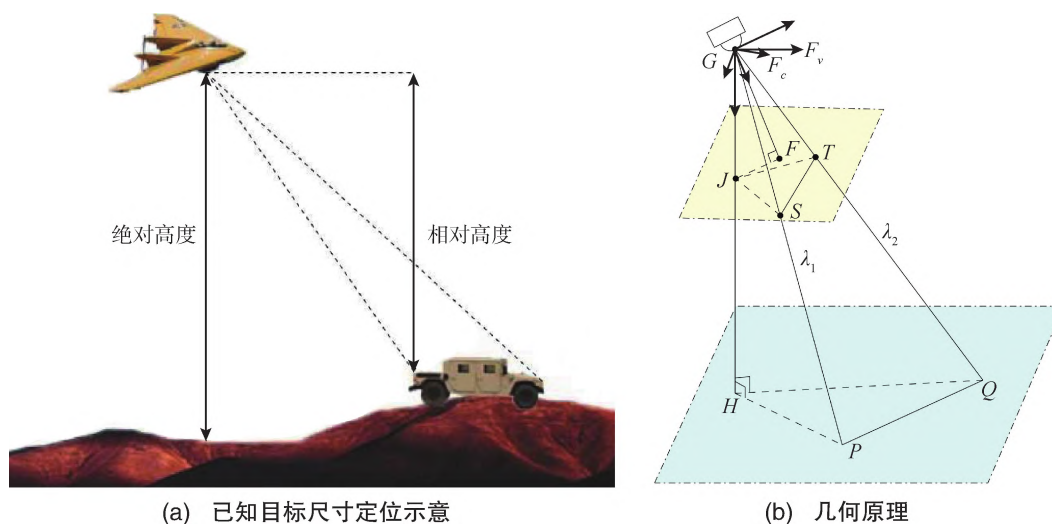


图7 已知目标尺寸的定位

Fig. 7 Schematic diagram of geolocation based on target size known

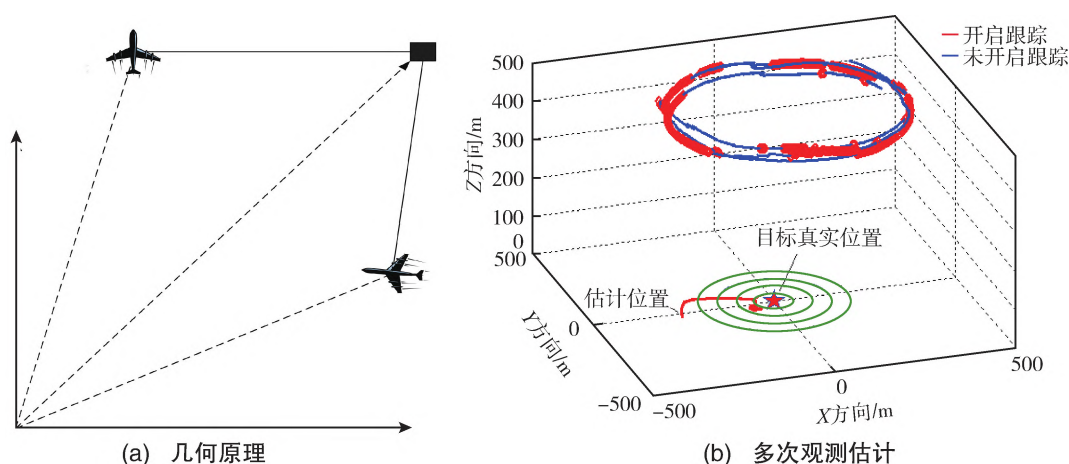


图8 三角定位

Fig. 8 Schematic diagram of geolocation based on triangulation

## 2.4 纯角度滤波定位

纯角度跟踪是指仅由测量点到目标点的方向角测量值估计运动目标的位置和速度, 常用于无源定位领域, 如被动雷达、声呐或光学定位<sup>[53]</sup>。由于丢失深度信息, 单目光学定位处理的也是纯角度测量问题, 部分研究采用纯角度滤波的方法对运动目标进行跟踪定位, 如文献[54] ~ 文献[57]。

纯角度滤波问题的核心是建立目标运动状态方程和观测方程, 从而通过 Kalman 滤波方法估计目标状态。对地定位问题一般建立线性运动状态

方程和非线性观测方程, 具体如下

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, 目标状态矢量  $\mathbf{x}$  为目标位置和运动速度,  $\mathbf{w}_k$  为状态转移误差(可描述随机加速度), 非线性测量函数  $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k)$  为  $k$  时刻无人机的测量值(一般包括目标图像坐标、各种无人机传感器状态参数等),  $\mathbf{v}_k$  为观测误差, 以上误差一般采用 Gauss 分布。在建立了目标运动状态方程后, 可以采用经典非线性 Kalman 滤波方法如 EKF、UKF、CKF 等来估计目标状态。

地基无源雷达对空目标跟踪是经典的纯角度跟踪应用,该场景中测量平台静止,且目标背景简单,因而跟踪精度较高。而在无人机对地视觉定位应用中,测量平台和目标都在运动,尤其是目标在地表运动,随机误差更大,这种纯角度滤波定位方法精度不高。

### 3 多机协同对地视觉定位研究现状

多机协同对地视觉定位方法主要有两种,一种是多机三角定位,一种是多机融合滤波定位,后者也包括了在纯角度测量值的基础上辅以额外信息的方法。

多机三角定位是单机三角定位方法的直接扩展,相比于单机,在满足同时测量的条件下可以定位静止以及运动目标。这类方法通常是中心化的,多架无人机将其观测同一个目标的测量数据传送到一个中心节点,利用各无人机状态确定多个视线方向,则交汇点就是目标位置。文献[58]、文献[59]分别采用两架或多架无人机目标视线交汇求解目标点位置,利用最小二乘、自适应 Kalman 滤波等方法对多个观测估计最优值。

相比于单机,多机融合滤波定位有更多测量数据,能够获得更高的精度,同时多机协同更容易识别目标,多机融合分为中心化与非中心化两种。以单个目标为例,目标状态方程如式(15)所示,目标测量方程个数由无人机架数决定,每架无人机对应一个如式(15)所示的测量方程,在中心节点汇成总的测量方程。文献[60]~文献[68]较早研究了多架无人机融合滤波对地定位,广泛采用 Kalman 滤波、粒子滤波和信息滤波等多种滤波方法,在滤波过程中通过估计通信延时和偏差,或引入更多观测量,或非中心化处理等方式提高位置估计精度。文献[69]侧重研究多个无人机如何调整队形跟踪目标。文献[70]~文献[72]提出分布式无人机传感器资源管理方法以及单架无人机吊舱姿态角控制方法,保证多个目标尽可能地在视场中。文献[73]引用文献[33]的方法先让每一架无人机对自身看到的目标进行定位,再利用多假设检验、对转换矩阵误差进行融合滤波等方法提高估计精度。

目前,多机协同对地视觉定位方法主要处理

单一目标,回避复杂的多目标数据关联问题,因而主要是对单机方法的直接扩展。

### 4 展望与结论

随着基于深度学习的计算机视觉技术飞速发展,为光电吊舱赋予智能目标检测与跟踪能力成为当下的研究和应用热点。目前,中小型无人机已经实现了嵌入式 AI 边缘计算平台的部署,具备机载端在线实时多目标检测与跟踪能力<sup>[32]</sup>。由于不需要人工操作,目标定位算法可实现实时多目标定位,从而具备与决策系统全自主衔接的能力,极大地提高了无人机感知的反应速度,提高了无人机智能化水平,强化了无人机在军事和民用领域的应用能力。多目标定位的智能化是未来的一个重要研究方向。

在军事上,无人机“蜂群战”的概念及相关技术已经成为美军的重要战略布局,实质是以大规模、低成本无人机集群为主体实现跨域分布式协同作战。基于视觉的协同感知是分布式协同的重要组成部分,协同目标识别和定位是其主要任务。协同必然涉及多源信息融合,在多目标任务中,数据关联是影响融合效果的重要方面,准确的识别判断和精确的定位能够提高数据关联的准确率,从而提高后续识别和定位精度,二者是一个耦合的过程。因此,与多源数据关联和识别相耦合的多源多目标协同定位技术是未来无人机视觉对地定位的一个重要研究方向。

当前,无人机光电吊舱通常配备具有高倍变焦功能的相机以观察远距离小目标,其定位原理是把目标放到视场中心,令目标的方向角与吊舱视线轴指向重合,从而规避相机内参数。若要实现视场内多个目标的同步定位,对于非视场中心的目标,内参数必须参与计算过程。变焦相机标定研究由来已久<sup>[74-75]</sup>,无人机吊舱变焦镜头通常具有视场大、变焦倍数大的特点,变焦相机标定方法在无人机吊舱领域的应用和研究未来必将成为一个重要的研究方向,以支撑无人机光电吊舱定位技术。

无人机飞控传感器精度有限,尤其是小型低成本无人机,在此条件下以提高定位精度为目标的研究也是一个重要方向。该方向可从两方面开

展研究, 一是通过更加合理的航迹规划<sup>[37-38,67]</sup> 特别是多机协同规划来提高定位精度; 二是融合多源传感器提高定位精度, 尤其是主动激光雷达、微波雷达等。

综上所述, 受益于计算机视觉智能的跨越式提升, 无人机将具备实时精准的多目标识别与跟踪能力、高效的飞行控制与协同能力以及多模态异构传感器信息融合能力, 无人机视觉地理定位技术未来将向着多目标、高精度和高可靠性地理定位方向发展。

### 参考文献

- [1] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.
- [2] Borky J M. Payload technologies and applications for uninhabited air vehicles(UAVs) [C]. IEEE Aerospace Conference, 1997, 3: 267-283.
- [3] Wolf P R. Elements of photogrammetry with applications in GIS[M]. McGraw-Hill Education, 2014.
- [4] Gilmore J F, Garren D A. Airborne video surveillance [C]. Proceedings of the SPIE, 1998, 3371: 2-10.
- [5] Ren S Q, He K M, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[C]. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing Systems, 2015, 1: 91-99.
- [6] Jiang P Y, Ergu D, Liu F Y, et al. A review of Yolo algorithm developments [J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1066-1073.
- [7] Wojke N, Bewley A, Paulus D. Simple online and real-time tracking with a deep association metric[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2017: 3645-3649.
- [8] Wang X, Liu J H, Zhou Q F. Real-time multi-target localization from unmanned aerial vehicles [J]. Sensors, 2017, 17(1): 33.
- [9] Cai G W. Unmanned rotorcraft systems[M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.
- [10] Hofmann-Wellenhof B. GPS: theory and practice [M]. New York: Springer Wien, 2001.
- [11] Wilson J P. Terrain analysis: principles and applications [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [12] Dobrokhodov V N, Kaminer I I, Jones K D, et al. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs [C]. American Control Conference, 2006: 1428-1433.
- [13] Hamidi M, Samadzadegan F. Precise 3D geo-location of UAV images using geo-referenced data[C]. International Conference on Sensors Models in Remote Sensing Photogrammetry, 2015: 269-275.
- [14] Johnston M G. Ground object geo-location using UAV video camera[C]. IEEE/AIAA 25<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, 2006: 1-7.
- [15] Doherty P, Rudol P. A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization[C]. Proceedings of the 20<sup>th</sup> Australasian Joint Conference on Advances in Artificial Intelligence, 2007: 1-13.
- [16] Rudol P, Doherty P. Human body detection and geolocalization for UAV search and rescue missions using color and thermal imagery[C]. IEEE Aerospace Conference, 2008: 1-8.
- [17] Ross J A, Geiger B R, Sinsley G L, et al. Vision-based target geolocation and optimal surveillance on an unmanned aerial vehicle[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008: 7448.
- [18] Qiao C, Ding Y L, Xu Y S, et al. Ground target geolocation based on digital elevation model for airborne wide-area reconnaissance system [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12: 016004.
- [19] Shukla P, Goel S, Singh P, et al. Automatic geolocation of targets tracked by aerial imaging platforms using satellite imagery[C]. ISPRS Technical Commission I Symposium, 2014: 1213-1220.
- [20] Kakaletsis E, Mademlis I, Nikolaidis N, et al. Multiview vision-based human crowd localization for UAV fleet flight safety [J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 99: 116484.
- [21] Ahn H S, Won C H. DGPS/IMU integration-based geolocation system: airborne experimental test results[J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(6): 316-324.
- [22] Han K, Aeschliman C, Park J, et al. UAV vision: feature based accurate ground target localization through propagated initializations and interframe homographies [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012: 944-950.
- [23] Conte G, Hempel M, Rudol P, et al. High accuracy

- ground target geo-location using autonomous micro aerial vehicle platforms[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008: 6668.
- [24] Keskin A. Fixed wing UAV target geolocation estimation from camera images[D]. Hacettepe University, 2021.
- [25] Han K M, DeSouza G N. Geolocation of multiple targets from airborne video without terrain data[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2011, 62(1): 159-183.
- [26] Han K M, DeSouza G N. Multiple targets geolocation using SIFT and stereo vision on airborne video sequences[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009: 5327-5332.
- [27] Kumar P, Sonkar S, Ghosh A K, et al. Real-time vision-based tracking of a moving terrain target from light weight fixed wing UAV using gimbal control[C]. 7<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 2020, 1: 154-159.
- [28] Choi J H, Lee D J, Bang H C. Tracking an unknown moving target from UAV; extracting and localizing an moving target with vision sensor based on optical flow[C]. 5<sup>th</sup> International Conference on Automation, Robotics and Applications, 2011: 384-389.
- [29] Hosseinpour H R, Samadzadegan F, Dadras Javan F. Precise target geolocation based on integration of thermal video imagery and RTK GPS in UAVs[C]. International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry, 2015: 333-338.
- [30] Hosseinpour H R, Samadzadegan F, Dadras Javan F. Precise target geolocation and tracking based on UAV video imagery[C]. ISPRS Congress, 2016: 243-249.
- [31] Zhao X Y, Pu F L, Wang Z H, et al. Detection, tracking, and geolocation of moving vehicle from UAV using monocular camera [J]. IEEE Access, 2019, 7: 101160-101170.
- [32] Liu X, Zhang Z Y. A vision-based target detection, tracking, and positioning algorithm for unmanned aerial vehicle [J/OL]. [https://downloads.hindawi.com/journals/wcmc/2021/5565589.pdf?\\_ga=2.64717483.566982403.1688005299-1592672278.1500954377](https://downloads.hindawi.com/journals/wcmc/2021/5565589.pdf?_ga=2.64717483.566982403.1688005299-1592672278.1500954377).
- [33] Barber D B, Redding J D, McLain T W, et al. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air vehicle[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2006, 47(4): 361-382.
- [34] Grocholsky B, Dille M, Nuske S. Efficient target geolocation by highly uncertain small air vehicles[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011: 4947-4952.
- [35] Wang D Z, Xu C, Yuan P F, et al. A revised Monte Carlo method for target location with UAV[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2020, 97(2): 373-386.
- [36] Pachter M, Ceccarelli N, Chandler P R. Vision-based target geolocation using micro air vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(3): 597-615.
- [37] Zhang L L, Deng F, Chen J, et al. Trajectory planning for improving vision-based target geolocation performance using a quad-rotor UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2382-2394.
- [38] Zhang L L, Chen J, Deng F. Aircraft trajectory planning for improving vision-based target geolocation performance[C]. 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control and Automation, 2017: 379-384.
- [39] Lin C, Zhang W, Shi J. Tracking strategy of unmanned aerial vehicle for tracking moving target[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(6): 2183-2194.
- [40] Xu C, Huang D Q, Liu J Y. Target location of unmanned aerial vehicles based on the electro-optical stabilization and tracking platform [J]. Measurement, 2019, 147: 106848.
- [41] Zhang X F, Yuan G Q, Zhang H W, et al. Precise target geo-location of long-range oblique reconnaissance system for UAVs[J]. Sensors, 2022, 22(5): 1903.
- [42] Zhou Y, Tang D Q, Zhou H, et al. Vision-based online localization and trajectory smoothing for fixed-wing UAV tracking a moving target [C]. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop, 2019: 153-160.
- [43] Wang X, Zhu H Y, Zhang D B, et al. Vision-based detection and tracking of a mobile ground target using a fixed-wing UAV[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(9): 156.
- [44] Sharma R, Yoder J, Kwon H S, et al. Vision based mobile target geo-localization and target discrimination using Bayes detection theory[C]. 11<sup>th</sup> International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2014: 59-71.
- [45] Monda M J, Woolsey C A, Reddy C K. Ground target lo-



- calization and tracking in a riverine environment from a UAV with a gimbaled camera[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007: 6747.
- [46] Zhang M F, Liu H H T. Vision-based tracking and estimation of ground moving target using unmanned aerial vehicle[C]. Proceedings of the American Control Conference, 2010: 6968-6973.
- [47] Yang X W, Lin D F, Zhang F B, et al. High accuracy active stand-off target geolocation using UAV platform[C]. IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, 2019: 1-4.
- [48] de Sousa J V R, Gamboa P V. Aerial forest fire detection and monitoring using a small UAV[C]. International Congress on Engineering—Engineering for Evolution, 2020: 242-256.
- [49] Zhang R, Liu H H T. Vision-based relative altitude estimation of small unmanned aerial vehicles in target localization[C]. Proceedings of the American Control Conference, 2011: 4622-4627.
- [50] Wang I H, Dobrokhodov V N, Kaminer I I, et al. On vision-based target tracking and range estimation for small UAVs[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005: 6401.
- [51] Madison R, DeBitto P, Olean A R, et al. Target geolocation from a small unmanned aircraft system[C]. IEEE Aerospace Conference, 2008: 1-19.
- [52] Sohn S, Lee B, Kim J, et al. Vision-based real-time target localization for single-antenna GPS-guided UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1391-1401.
- [53] Farina A. Target tracking with bearings—only measurements[J]. Signal Processing, 1999, 78(1): 61-78.
- [54] Ponda S S, Kolacinski R M, Frazzoli E. Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009: 6015.
- [55] Campbell M E, Wheeler M. A vision based geolocation tracking system for UAV's[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006: 6246.
- [56] Campbell M E, Wheeler M. Vision-based geolocation tracking system for uninhabited aerial vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(2): 521-532.
- [57] Farmani N, Sun L, Pack D. An optimal sensor management technique for unmanned aerial vehicles tracking multiple mobile ground targets[C]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2014: 570-576.
- [58] Bai G B, Liu J H, Song Y M, et al. Two-UAV intersection localization system based on the airborne optoelectronic platform[J]. Sensors, 2017, 17(1): 98.
- [59] Xu C, Yin C J, Huang D Q, et al. 3D target localization based on multi-unmanned aerial vehicle cooperation[J]. Measurement and Control, 2021, 54(5/6): 895-907.
- [60] Campbell M E, Whitacre W W. Cooperative tracking using vision measurements on SeaScan UAVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 613-626.
- [61] Wheeler M, Schrick B, Whitacre W W, et al. Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs[C]. IEEE/AIAA 25<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, 2006: 1-9.
- [62] Whitacre W W, Campbell M E, Wheeler M, et al. Flight results from tracking ground targets using SeaScan UAVs with gimbaling cameras[C]. American Control Conference, 2007: 377-383.
- [63] Whitacre W W, Campbell M E. Cooperative geolocation with UAVs under communication constraints[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007: 6759.
- [64] Whitacre W W, Campbell M E. Cooperative geolocation and sensor bias estimation for UAVs with articulating cameras[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009: 6220.
- [65] Whitacre W W. Cooperative geolocation using UAVs with gimbaling camera sensors with extensions for communication loss and sensor bias estimation[D]. Cornell University, 2010.
- [66] Tisdale J, Ryan A, Kim Z, et al. A multiple UAV system for vision-based search and localization[C]. American Control Conference, 2008: 1985-1990.
- [67] Taghavi E, Song D, Tharmarasa R, et al. Geo-registration and geo-location using two airborne video sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(4): 2910-2921.
- [68] Lin B, Wu L Z, Niu Y F, et al. Error analysis and accuracy improvement of vision-based multi-UAV cooperative target localization[C]. International Conference on Autonomous Unmanned Systems, 2021: 2497-2507.

(下转第20页)

46(1) : 1-8.

YANG Yuan-xi, XU Tian-he, XUE Shu-qiang. Progresses and prospects in developing marine geodetic datum and marine navigation of China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1) : 1-8.

- [46] 任翀, 李楠, 杜照鹏. 大深度无人潜航器研究现状及发展趋势[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(1) : 63-71.

REN Chong, LI Nan, DU Zhao-peng. Research status and development trend of deep-sea AUV/ARV [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2023, 6(1) : 63-71.

- [47] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(11) : 525049.

WANG Wei, XING Chao-yang, FENG Wen-shuai. State of the art and perspectives of autonomous navigation technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,

2021, 42(11) : 525049.

- [48] 许江宁. 浅析水下 PNT 体系及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1) : 1-6.

XU Jiang-ning. Analysis on underwater PNT system and key technologies[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1) : 1-6.



姓名: 李鹏

性别: 男

学历: 博士研究生

专业: 导航、制导与控制

职称: 高级工程师

研究方向: 捷联惯性导航系统及水下组合导航技术

(上接第 33 页)

- [69] Zhang M. Vision-based estimation and tracking using multiple unmanned aerial vehicles[D]. University of Toronto, 2013.

- [70] Sharma R, Pack D. Cooperative sensor resource management to aid multi target geolocalization using a team of small fixed-wing unmanned aerial vehicles [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2013: 4706.

- [71] Khanapuri E M, Sharma R. Uncertainty aware geo-localization of multi-targets with multi-UAV using neural network and extended kalman filter[C]. AIAA Scitech Forum, 2019: 1690.

- [72] Ding C, Morye A A, Farrell J A, et al. Coordinated sensing and tracking for mobile camera platforms [C]. American Control Conference, 2012: 5114-5119.

- [73] Sakamaki J Y, Beard R W, Rice M D. Cooperative estimation for a vision-based target tracking system[C]. In-

ternational Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2016: 878-885.

- [74] Ayaz S M, Kim M Y, Park J. Survey on zoom-lens calibration methods and techniques[J]. Machine Vision and Applications, 2017, 28(8) : 803-818.

- [75] An P, Jie M, Ma T, Fang B, Yu K, Liu X, Zhang J. Two-point calibration method for zoom camera with approximate focal-invariant radial distortion model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2021 : 38.



姓名: 朱得谦

性别: 男

学历: 博士

专业: 信息与通信工程

职称: 助理研究员

研究方向: 统计信号处理、模式识别、计算机视觉