

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.017

# 无人机稳像系统研究综述

张素杰<sup>1</sup>, 董兴浩<sup>2</sup>, 常蓉峰<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学天津学院, 天津 301830; 2. 北京科技大学智能科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对无人机在飞行过程中会受到机身或环境的影响而造成航拍设备的抖动, 对面向无人机平台的稳像系统进行分析。在简要介绍研究背景的基础上, 主要从机械稳像和电子稳像 2 方面进行展开, 系统介绍国内外研究现状和多种典型的稳像算法, 分析无人机稳像系统未来可能发展的研究方向。结果表明, 该研究对无人机航拍图像的增稳及不同场景下稳像方法的选取具有一定的指导作用。

**关键词:** 无人机稳像系统; 机载增稳云台; 电子稳像; 复合稳像

**中图分类号:** TP391; V279 **文献标志码:** A

## Overview of UAV Image Stabilization System

Zhang Sujie<sup>1</sup>, Dong Xinghao<sup>2</sup>, Chang Rongfeng<sup>2</sup>

(1. Tianjin College, University of Science and Technology Beijing, Tianjin 301830, China;

2. School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In view of the vibration of aerial photography equipment caused by the influence of the fuselage or environment during the flight of UAV, the image stabilization system for UAV platform is analyzed. Based on the brief introduction of the research background, this paper mainly introduces the mechanical image stabilization and electronic image stabilization, systematically introduces the research status at home and abroad and a variety of typical image stabilization algorithms, and analyzes the possible future development direction of UAV image stabilization system. The results show that the study has a certain guiding role in the augmentation of UAV aerial images and the selection of image stabilization methods in different scenes.

**Keywords:** UAV image stabilization system; airborne stabilized platform; electronic image stabilization; composite image stabilization

## 0 引言

无人机是现代军队中的重要武器装备, 具有成本相对较低、机动性强、不会造成人员伤亡等特点, 主要应用于低空巡航、情报侦察、精准定点打击等军事作战场景<sup>[1]</sup>。按照飞行模式, 无人机可分为固定翼无人机、旋翼无人机和仿生扑翼无人机<sup>[2]</sup>。近年来, 随着国防军队建设和无人机技术的快速发展, 越来越多的无人机正在逐渐替代飞行员执行高强度、高风险、大规模的搜寻、侦察等作战任务, 具有广阔的应用前景。

视觉侦察是无人机作战的重要任务之一, 在执行此类任务时, 无人机携带智能设备进行航拍和实时图像处理<sup>[3-4]</sup>。然而, 无人机在飞行过程中会受到自身和环境的影响, 航拍设备存在抖动现象, 极大地影响航拍视频的感观质量和效果, 同时也对基于图像的目标检测、跟踪、定位等功能造成影响。因此, 研究无人机稳像系统具有重要意义。

针对无人机稳像问题, 目前已有大量文献从不

同角度提出了多种解决方案, 稳像系统主要分为机械稳像和电子稳像 2 类。其中, 机械稳像是通过设计两轴或三轴的增稳云台, 保持航拍设备在惯性空间中的姿态稳定进而获取稳定清晰的视频图像, 因此该部分的研究重点在于采取不同的控制策略, 设计一款响应速度快、超调量小、稳定精度高的机载增稳云台。另一方面, 电子稳像是通过软件算法对航拍图像序列进行有效变换, 消除原视频中的高频抖动部分, 使处理后的视频更加清晰稳定。因此该方面的研究重点在于设计不同的视频稳像算法, 不断提升图像处理的速度和稳像的效果。笔者从机械稳像(硬件方面)和电子稳像(软件方面) 2 方面进行系统梳理, 对无人机稳像算法的研究进行综述, 重点介绍不同方法的基本原理并分析各自的优势和不足, 为进一步的相关研究提供参考。

## 1 无人机稳像系统研究现状

### 1.1 机械稳像

在无人机中, 云台是相机的载体, 也是航拍设

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-02-13

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2021KJ066)

第一作者: 张素杰(1985—), 男, 河南人, 硕士。

备和机身连接的纽带；因此，设计一款增稳云台至关重要。

在军事领域已研制出多款无人机机载增稳云台<sup>[5]</sup>。以色列的 ESP-600C 型无人机机载光电侦察云台，俯仰轴转动范围为  $10^{\circ}\sim-110^{\circ}$ ，偏航轴转动范围为  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ，视轴稳定精度为  $15\ \mu\text{rad}$ ，最大角速度  $50\ (^{\circ})/\text{s}$ 。此外，CONTROP 精密技术公司开发研制的微光相机增稳云台 L-STAMP，采用三轴陀螺稳定结构，视轴稳定精度优于  $150\ \mu\text{rad}$ ，偏航轴、滚转轴和俯仰轴转动范围分别为  $-175^{\circ}\sim 175^{\circ}$ 、 $-175^{\circ}\sim 175^{\circ}$ 、 $-40^{\circ}\sim +70^{\circ}$ ，重量为  $750\ \text{g}$ 。这 2 种机载增稳云台在军事领域中代表了国际先进水平，但其价格均十分昂贵。在民用市场中，大疆无人机在全球消费级无人机市场占有率约为 70%，其无人机 PHANTOM 4PRO V2.0 搭载了三轴机载增稳云台，静态控制精度为  $0.02^{\circ}$ ，俯仰轴转动范围为  $-90^{\circ}\sim +30^{\circ}$ ，俯仰轴最大控制转速为  $90\ (^{\circ})/\text{s}$ ，在业界水准较高。

在机载增稳云台控制算法方面，大部分使用经典控制理论，其中经典 PID 算法简单可靠、易于实现，对于有精确数学模型的系统有非常好的性能<sup>[6]</sup>。陈孟臻<sup>[7]</sup>使用 PID 算法设计了最简单的控制系统，对陀螺仪和加速度计检测的数据进行姿态解算以获取云台的俯仰角和滚转角信息，再将相应的姿态角度作为 PID 控制器输入，使用 PID 控制算法对云台电机进行反向补偿控制，并通过相应的实验验证了该方案的可行性。定平台比单速度环控制结构的控制精度更高。李小斌等<sup>[8]</sup>基于 PID 控制系统，采用了经典的位置、速度、电流三闭环结构，采用比例积分 (PI) 控制电机速度调节器和电流调节器，使用比例 (P) 控制位置调节器，并在 Matlab 中建立了系统的控制模型进行仿真，仿真结果表明该系统具有良好的控制性能。王娜<sup>[9]</sup>研究了无人机云台控制器的硬件设计，在经典的位置、速度、电流三闭环控制结构的基础上采用比例积分 (PI) 控制速度环，使用自适应控制方法控制位置环，推导了自适应律并完成了控制器的设计。最后调试了云台各硬件模块，实验表明了该硬件设计和控制方法的可行性。

现代控制技术相关理论逐渐成熟，相应的控制技术也越来越多地应用于机载云台稳像系统中。陈彤阳等<sup>[10]</sup>在传统单处理器控制的基础上设计了双处理器控制的两轴云台稳像控制系统，该系统通过模糊 PID 控制器实现云台自稳定和运动控制。实验

结果表明，在低频和低幅震动下，可以实现对两轴云台稳像的运动控制并有效隔离两轴扰动，适用于机载光电载荷的运动控制及视轴稳定。针对三轴机载云台高度不确定性的干扰因素和复杂工作环境，陈茂轩<sup>[11]</sup>基于云台执行机构位置回路设计了区间二型模糊滑模控制器，仿真分析和平台调试结果表明该方法对外界干扰和系统参数摄动有较好的鲁棒性。

针对 PID 控制器适应性差的缺点，董岩<sup>[12]</sup>将神经网络自适应校正和常规频域校正巧妙地结合起来，设计了一种基于 PID 神经网络的模型参考自适应控制方法，该方法既可以对控制系统的数学模型进行自适应校正，同时又可以对负载扰动变化进行有效地补偿。利用神经网络的自学习特点，王连明等<sup>[13]</sup>提出一种稳定平台的执行电机速度环自适应控制方法，该方法能够有效地提高稳定平台速度环的响应速度和带宽，降低对被控对象数学模型精度的依赖，具有十分广泛的实用价值。

基于传统人工调节 PID 控制参数的繁琐方式，林峰等<sup>[14]</sup>使用自适应容错控制方法设计了两轴框架云台容错控制器，仿真结果表明该控制器的闭环扰动容许能力比传统的固定增益控制器的闭环扰动容许能力高，云台控制系统更加安全稳定。该团队后续还采用遗传算法来整定 PID 控制参数，仿真实验证明该方法整定的参数使控制系统响应速度更快，并且无超调扰动。此外，要亚忠<sup>[15]</sup>将 ADRC 控制算法应用于三轴机载增稳云台的控制系统，改善了三轴机载增稳云台中非线性干扰的问题。测试结果表明 ADRC 控制器的三轴机载云台方案具有较强的抗扰能力和较高的跟踪精度。

在实际应用中，常采用将经典 PID 控制和先进控制器相结合的设计思路，结合经典 PID 控制和先进控制算法的优点，克服了经典 PID 控制的不足和先进控制器算法复杂的缺点。进而应用于机载增稳云台系统控制，使其具有响应速度快、稳定精度高和抗扰能力强的优点，同时也具有很强的鲁棒性和适应性。

## 1.2 电子稳像

电子稳像运用数字图像处理技术，通过帧间运动估计及图像运动滤波补偿，对视频图像序列进行消抖处理，现已大规模应用于无人机航拍稳像系统。

电子稳像主要分为运动估计、运动滤波和运动补偿 3 步：运动估计是通过相应算法计算图像序列

的运动矢量；运动滤波是运用滤波算法对运动矢量中的高频抖动量进行滤波；运动补偿是根据运动滤波得到的运动矢量，对源图像进行反向补偿，实现对原视频的消抖效果。

运动估计的方法有很多种，常见的有特征匹配法、光流法等。无人机航拍视频中可能会出现大幅度抖动情况。针对这种情况，袁威等<sup>[16]</sup>提出一种将灰度投影和块匹配算法相结合的平移运动估计。其结合图像极坐标变化的旋转缩放运动估计方法，组成一套完整的全局运动估计方法。实验结果表明该方案明显提高了全局运动估计方法的速度和精度。A.Lim 等<sup>[17]</sup>提出了一种适用于无人飞行器的运动模型，并以此设计出一套新的稳像算法，该算法避免了估计通用运动模型和投影变换，并考虑了较简单的运动模型。同时为了提高算法的运算速度，采用基于光流的跟踪来取代现有技术所用的常规跟踪和匹配方法。该算法在速度大幅提高的同时获得了较好的稳像效果。此外，王春才<sup>[18]</sup>针对电子稳像算法计算慢而不能满足实时性的问题，提出了一种基于 SUSAN 角点检测算法的改进算法。该算法通过分析角点所在区域灰度值的变化，改进了 SUSAN 角点检测算法中的判断准则，提高了算法的速度和精度，实现了无人机对电子稳像算法实时性的要求。

电子稳像算法采用运动滤波将期望运动和高频抖动分离开来，通常使用的滤波器有滑动均值滤波、一阶惯性滤波和卡尔曼滤波算法。W.G.Aguilar 等<sup>[19]</sup>通过研究微型飞行器的 ANN 学习模型的卡尔曼滤波器，提出了一种新的视频稳定方法。该方法通过几何变化和离群值剔除来进行鲁棒的帧间运动滤波，避免计算出错误的运动参数。此外，孙鹏<sup>[20]</sup>根据无人机视频图像的特点，对基于 Kalman 滤波器的 Sage-Husa 自适应滤波器进行了改进，将成像载荷的主动运动和随机抖动分离出来。通过滤波消除随机抖动产生的帧内模糊，获得更为有效的运动矢量，并利用改进算法对帧间运动矢量做出补偿，使其在视频图像出现噪声或帧间光照、灰度、对比度变化较大的情况下仍具有良好的稳像效果。

小型无人机影像中存在畸变、大倾角等不稳定因素，给电子稳像带来了很大的困难。买莹<sup>[21]</sup>采用射影变换模型进行无人机大倾角视频图像运动估计，针对射影变换模型提取主运动难的问题，提出了利用图像中心运动轨迹拟合的转弯主运动估计方法，同时使用动态拼接与常规稳像相结合的稳像策略，解决了大倾角稳像信息损失严重和难以判别方

位的问题。此外，郑鸿云等<sup>[22]</sup>提出了一种快速最优化的稳像方法，该方法结合了  $L_1$  最优化方法的精确性和 Kalman 滤波方法处理速度快的优点，并克服 Kalman 滤波法预测精度不高和  $L_1$  最优化方法只能事后处理的问题，从而获得更好的稳像效果。经过实验验证，该算法在保证稳像处理精度的前提下，也保证了处理效率。

在传统电子稳像的基础上，随着深度学习的快速发展，基于深度学习的电子稳像算法也逐渐取得了进展和突破。清华大学的汪淼团队<sup>[23]</sup>首先使用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)来解决电子稳像问题，提出了基于 CNN 框架的稳像模型 StabNet，并创建了用于有监督学习的数据集 DeepStab，具有重要意义。J.Choi 等<sup>[24]</sup>首先提出自监督学习的全帧视频稳像算法 DIFINT，该算法以迭代的方式对相邻帧进行插值，从而降低帧间抖动，并且可以生成没有裁剪和低失真的视频帧，具有良好的效果。对于景深不断变化的场景，Y.C.Lee 等<sup>[25]</sup>基于有监督学习方法框架提出一种新的基于深度的 3D 学习方法，结合 3D 场景深度和相机运动来平滑相机抖动并合成稳定的视频。此外，Shi 等<sup>[26]</sup>将深度学习算法结合硬件传感器数据，提出了一种深度神经网络(deep neural networks, DNN)。该算法将陀螺仪数据和图像特征内容相结合，通过无监督学习的方式进行稳像。虽然这些算法还未在无人机航拍处理中普遍运用，但是经过相关实验测试，上述基于深度学习的算法与传统算法相比较，在稳像效果方面具有较大的优势，因此在无人机稳像系统中有着广阔的应用前景。

## 2 稳像系统典型算法

在机械稳像算法中，基于直流电机的三闭环云台控制算法和基于模糊 PID 的云台控制算法应用广泛，效果较好，是经典控制和先进控制算法的典型算法；在电子稳像算法中，基于块匹配法的电子稳像算法和基于 StabNet 框架的稳像算法分别是基于传统方法和深度学习方法的经典算法。笔者主要介绍几种典型的稳像算法，阐述其原理和思想。

### 2.1 稳像云台三闭环控制算法

机载增稳云台常用无刷直流电机作为执行机构实现增稳功能，具有响应速度快、易于控制的特点。为保证云台的响应速度和跟踪精度，常结合磁场定向控制(field oriented control, FOC)算法，采取位置、转速以及电流(转矩)的三闭环电机控制算法，实现

三轴电机的稳定控制。

位置环、速度环和电流环的三闭环控制框图如图 1 所示，在传统的电流环和速度环的外层加入位置环控制，将编码器采集到的位置信息 P 作为负反馈，与期望位置 Position\_ref 进行比较得到位置控制的误差，经过比例控制器，继而将输出的控制量作为速度环的参考输入量，实现位置环、速度环和电流环的三闭环串级 PID 控制系统。相较于单速度环控制结构或双速度环控制结构，该三闭环控制结构对位置具有更高的控制精度，更好的应用于动态补偿抖动达到稳像效果。

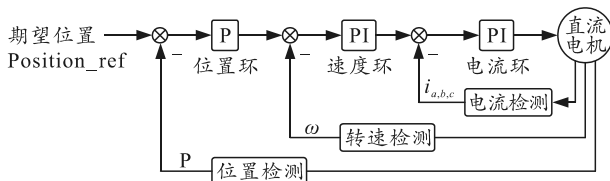


图 1 三闭环控制

### 2.2 基于模糊 PID 云台控制算法

模糊控制是将专家经验编成模糊规则，然后将来自传感器的实时信号模糊化，将模糊化后的信号作为模糊规则的输入，完成模糊推理，再将推理后得到的输出量加到执行器上。

对云台稳像系统使用模糊控制器(如图 2 所示)，其中  $r(t)$  为目标角度， $e$  为角度偏差值， $ec$  为偏差变化率。每次调节前，将不同的  $e$  和  $ec$  输入到模糊推理器中，根据变化实时调整 PID 3 个参数的补偿量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ，从而满足不同的偏差  $e$  及偏差变化率  $ec$  对 PID 控制器参数的需求，使被控对象有更好的动态性能。

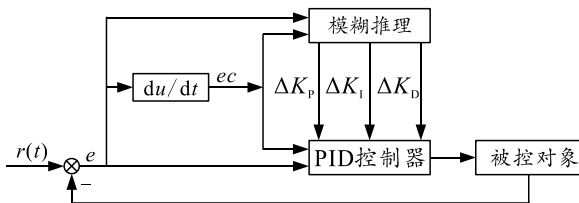


图 2 模糊 PID 控制器结构

针对增稳云台控制过程中出现的抖振现象，通过编制相应的模糊规则，模糊 PID 控制可以抑制抖振现象，而且具有良好的跟随性，使云台可以快速地响应控制指令，保持负载设备的视轴稳定。

### 2.3 基于块匹配法的电子稳像算法

在无人机航拍视频中，俯仰轴的旋转抖动和滚转轴的旋转抖动所造成的视频抖动效果是不同的，在图像中不同部分的抖动规律也不尽相同。针对该

场景问题，基于块匹配法的电子稳像算法(如图 3 所示)将整体图像进行部分分割，对每一小块图像的运动估计分别进行分析，得到完整的全局运动估计，该方法可以提高全局运动估计的速度和精度。

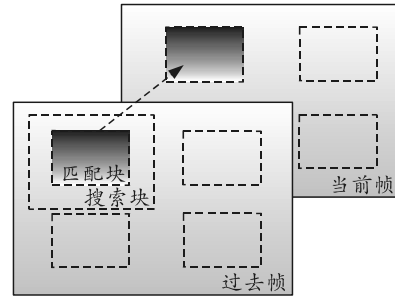


图 3 块匹配

视频稳像的处理流程如图 4 所示，视频图像先使用灰度投影得到平移运动估计并作为初始值，再进行块匹配得到最终的平移运动估计。对块匹配配准后的图像使用极坐标变换，再进行块平面匹配得到旋转缩放的运动估计。最后使用滤波器对全局运动估计进行运动轨迹平滑，产生稳像后的视频输出。

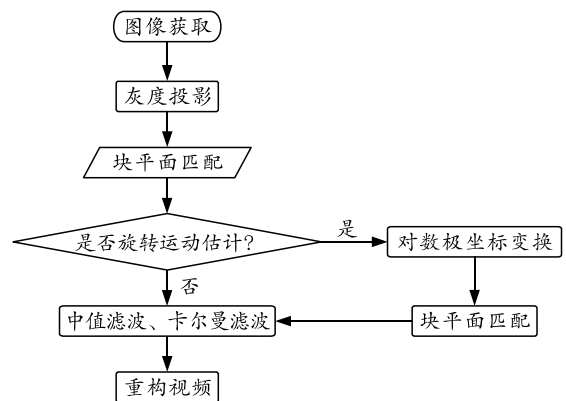


图 4 算法处理流程

### 2.4 基于 StabNet 框架的电子稳像算法

StabNet 提出的以 CNN 为框架的深度学习稳像算法，基于有监督的学习方式，其在训练过程中使用稳定和不安定的视频序列对。此外，该算法在图像处理时不使用未来帧，而且运行速度快，可实时对航拍视频进行稳像处理。

如图 5 所示，StabNet 是一个两分支神经网络，2 个分支之间有共享参数。它由编码器和多网格回归器组成，其中编码器是一个自适应 ResNet-50 模型，它将输入级联帧编码为  $1 \times 1 \times 2048$  的特征向量。多网格回归器由一系列 FC 层组成，其中最后一个 FC\_reg 层回归维度为  $(h+1) \times (w+1) \times 2$  的网格顶点位置， $h$  和  $w$  分别是沿  $x$  轴和  $y$  轴的网格编号。在训练期间，对 2 个连续传入帧进行采样，并将相应的

历史帧馈送到网络，然后以稳定性损失、形状保持损失和时间损失为损失函数，对网络进行的训练。经过训练和测试，StabNet 具有较好的运行速度和处理效果，尤其能够处理如夜景视频、带水印视频、模糊视频和嘈杂视频等低质量视频。

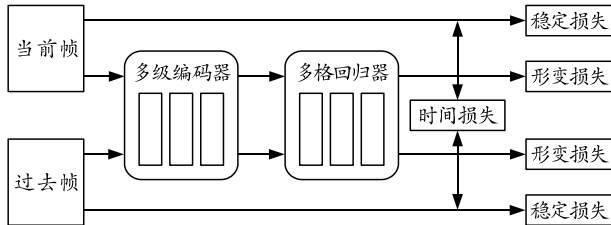


图 5 StabNet 模型框架

### 3 结束语

笔者系统梳理了无人机稳像方法，主要按照机械稳像和电子稳像 2 方面进行了不同算法的总结。在机械稳像方面，传统的 PID 控制算法结合现代先进控制策略更加适用于不同的消抖控制场景，是未来发展的主要方向；电子稳像方面，基于深度学习的算法已展现出较强的稳像优势，是当前的研究热点及发展趋势。此外，机械稳像和电子稳像的复合应用可以使增稳效果相叠加，实现更好的稳像效果<sup>[27]</sup>。基于无人机平台的双重稳像形式的复合应用也是未来的发展方向之一。

### 参考文献：

[1] 丁宇, 李书文. 民用固定翼无人机发展现状以及未来展望[J]. 电子技术与软件工程, 2018(23): 82-83.

[2] FU Q, WANG J, GONG L, et al. Obstacle Avoidance of Flapping-Wing Air Vehicles Based on Optical Flow and Fuzzy Control[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 38(2): 206-215.

[3] 成海秀, 陈河源, 曹惠茹, 等. 无人机目标跟踪系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 165-167.

[4] 付强, 陈向阳, 郑子亮, 等. 仿生扑翼飞行器的视觉感知系统研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1512-1519.

[5] 薛丹. 光电侦察平台的技术发展概况和发展趋势综述[J]. 教练机, 2011(3): 43-46.

[6] KIM M, BYUN G S, KIM G H, et al. The Stabilizer Design for a Drone-Mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller and Tuned Mass Damper[J]. International Journal of Control and Automation, 2016, 9(5): 387-394.

[7] 陈孟臻. 基于 MPU-6050 陀螺——加速度仪三轴云台的研究[J]. 百色学院学报, 2015, 28(3): 126-131.

[8] 李小斌, 吴宏岐, 袁战军, 等. 一种高性能云台控制系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(2): 46-50.

[9] 王娜. 无人机云台控制器硬件设计与控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[10] 陈彤阳, 王向军. 面向小型无人机的两轴稳像云台控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(8): 63-68.

[11] 陈茂轩. 三轴增稳云台二型模糊控制的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

[12] 董岩. 基于神经网络的机载三轴稳定平台控制系统算法应用研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.

[13] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2002.

[14] 林峰, 王晓晓, 曲晓光. 四旋翼无人机航拍云台的控制系统设计[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(5): 55-60.

[15] 要亚忠. 三轴机载增稳云台 ADRC 控制的研究及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[16] 袁威, 高跃清, 吴金亮. 基于灰度投影和块匹配的无人机视频稳像方法[J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 19-22.

[17] LIM A, RAMESH B, YANG Y, et al. Real-time optical flow-based video stabilization for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2019, 16(6): 1975-1985.

[18] 王春才, 赵红颖, 程印乾, 等. 无人机电子稳像技术中角点检测算法的改进[J]. 影像技术, 2008(6): 41-45.

[19] AGUILAR W G, ANGULO C. Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles[J]. Neural Processing Letters, 2016, 43(2): 459-477.

[20] 孙鹏. 无人机高清视频电子稳像算法研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2014.

[21] 买莹. 小型无人机大倾角飞行状态的稳像技术研究[D]. 北京: 北京大学, 2012.

[22] 郑鸿云, 赵红颖, 魏云鹏, 等. 小型无人机快速最优化稳像方法研究[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 51-58.

[23] WANG M, YANG G Y, LIN J K, et al. Deep Online Video Stabilization With Multi-Grid Warping Transformation Learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(5): 2283-2292.

[24] CHOI J, KWEON I S. DIFRINT: Deep Iterative Frame Interpolation for Full-Frame Video Stabilization[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). IEEE, 2020: 3732-3736.

[25] LEE Y C, TSENG K W, CHEN Y T, et al. 3D Video Stabilization with Depth Estimation by CNN-based Optimization[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2021: 10621-10630.