



电光与控制

Electronics Optics & Control

ISSN 1671-637X, CN 41-1227/TN

## 《电光与控制》网络首发论文

题目: 旋翼无人机的双目视觉避障技术综述  
作者: 吕东超, 李少波, 蒲睿强, 张黔富, 陈光林, 矿华聪  
收稿日期: 2022-10-28  
网络首发日期: 2023-07-03  
引用格式: 吕东超, 李少波, 蒲睿强, 张黔富, 陈光林, 矿华聪. 旋翼无人机的双目视觉避障技术综述[J/OL]. 电光与控制.  
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/41.1227.TN.20230703.1450.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 旋翼无人机的双目视觉避障技术综述

吕东超, 李少波, 蒲睿强, 张黔富, 陈光林, 矿华聪

(贵州大学, 贵阳 550000)

**摘要：**在复杂环境中执行任务已经成为旋翼无人机发展的必然趋势。为了让旋翼无人机在复杂环境中高效、安全的执行任务，学者们对旋翼无人机的双目视觉避障技术展开了广泛的研究。为了解旋翼无人机的双目视觉自主避障技术的现状及发展趋势，论文首先介绍了双目视觉避障系统的构成，分析各技术在双目视觉避障系统中的作用；然后，重点介绍双目视觉避障技术中常用的相机标定方法、立体匹配算法和避障算法，并阐述最新发展，总结了各自的优缺点；最后，对双目视觉避障技术的发展方向进行了展望。

**关键词：**旋翼无人机；相机标定方法；立体匹配算法；避障算法

**中图分类号：**V249.3；TP391

## A review of binocular vision obstacle avoidance technology for rotorcraft UAVs

Lü DongChao, Li ShaoBo, Pu RuiQiang, Zhang QianFu, Chen GuangLin, Kuang HuaCong

(Guizhou University, Guiyang 550000, China)

**Abstract:** Performing missions in complex environments has become an inevitable trend in the development of rotary-wing UAVs. Considering the efficient and safe execution of rotary-wing UAVs in complex environments, scholars have conducted extensive research on binocular vision obstacle avoidance technology for rotary-wing UAVs. In order to understand the current situation and development trend of binocular vision autonomous obstacle avoidance technology for rotorcraft, firstly, the composition of binocular vision obstacle avoidance system is introduced, and the role of each technology in binocular vision obstacle avoidance system is discussed; then, the camera calibration method, stereo matching algorithm and obstacle avoidance algorithm commonly used in binocular vision obstacle avoidance technology are introduced, and the latest development is explained, and the advantages and disadvantages of each are summarized; finally, the development direction of binocular vision obstacle avoidance technology is foreseen.

**Keywords:** rotorcraft UAVs; camera calibration methods; stereo matching algorithms; obstacle avoidance algorithms

收稿日期：2022-10-28 修回日期：2023-01-02

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52275480）；国家重点研发计划（2020YFB1713300）

作者简介：吕东超（1996-），男，内蒙古通辽人，硕士生。

通讯作者：李少波（1973-），男，湖南岳阳人，博士，教授，博导。

## 0 引言

旋翼无人机因其体积小、重量轻、垂直起降、控制灵活等优点，被广泛用于军事打击、电力巡检、植物病虫害检测等领域<sup>[1-3]</sup>。随着任务复杂性的提高，尤其在低空环境下，不仅有静态障碍物，还要面对动态障碍物<sup>[4]</sup>，这迫切要求其具有自主避障的

能力。目前,双目视觉具有能够还原环境的三维信息、体积小、功耗低、对硬件要求低等优点<sup>[5,6]</sup>,被广泛用于无人机的自主避障系统中。然而关于旋翼无人自主避障的综述<sup>[4,7,8]</sup>很少介绍双目视觉避障系统中应用的技术,因此本文将阐述双目视觉避障中应用的技术,并对三种核心算法进行重点介绍。

## 1 旋翼无人机双目避障系统

无人机双目视觉自主避障是通过双目视觉相机对三维环境中的障碍物进行检测,并进行自主避障,其中涉及视觉模块、GPS、辅助传感器、姿态速度控制模块和遥控接收模块等<sup>[9]</sup>,无人机视觉自主避障系统结构如下图1。

其中,视觉模块是获取三维世界中的图像,并通过图像处理、立体匹配等技还原真实三维世界,其组成有相机和图传系统等;辅助传感器主要是对视觉模块进行补充,使三维场景的还原更加精准,

如毫米波雷达等;数据传输模块主要是对辅助传感器的数据进行采集并上传;遥控接收模块主要接收地面的遥控信息,其组成有红外接收器、遥控器等;GPS 主要用来定位无人机位置及导航,对于室内避障可用其他传感器代替,如激光雷达等;飞行状态测量模块主要测量无人机的飞行参数,如陀螺仪等;信息融合处理模块主要用来处理传感器、视觉模块等获取的信息,并对其进行解算算出下一时刻无人机的速度等信息;姿态速度控制模块主要是变换无人机的姿态及对无人机速度进行控制。

由图1可看出基于视觉的无人机自主避障技术涉及面广,但重难点在于视觉模块、信息融合处理模块,而视觉模块的重难点主要在于相机标定、立体匹配技术,信息融合处理模块的难点主要在于如何在整合所有信息后,准确高效的进行避,针对这两个方面将再下面展开介绍。

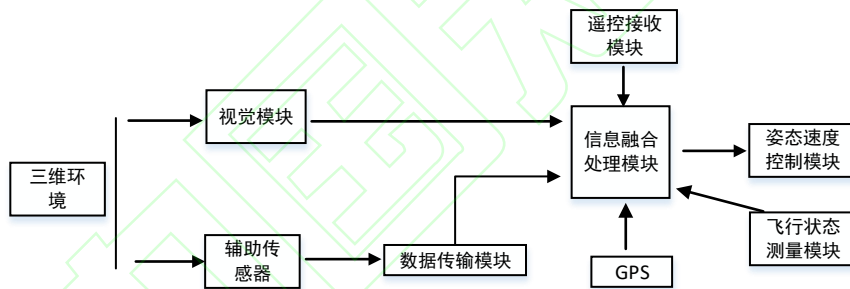


图1 视觉自主避障系统结构

Fig.1 Structure diagram of visual autonomous obstacle avoidance system

## 2 相机标定方法

相机标定是计算机视觉的重要问题,它用来评估相机内外部的参数进而更准确的还原真实环境,其中内部参数描述了摄像机系统的内部几何和光学特性,外部参数描述了世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转和平移变换<sup>[10]</sup>,因此相机标定是计算机视觉后期工作的基础。目前,旋翼无人机的双目避障系统常用标定方法有传统相机标定法、主动视觉相机标定法和相机自标定法等,下面将分别进行介绍。

### 2.1 传统相机标定方法

在传统标定法中,标定时需要参考物体,并且标定物的尺寸是确定的,从而建立标定物的物点与成像点的映射关系,常用的方法有直接线性法、张氏标定法和Tsai两步法等。

#### 2.1.1 直接线性法

直接线性法不考虑畸变产生的影响,直接应用测量学的方法研究图像点与物点之间的关系,进而构建出线性模型,求解出内外参数。

#### 2.1.2 Tsai两步法

Tsai两步法考虑了径向畸变,其求解的第一步不考虑畸变影响,求相机的内外参数;第二步,将径向畸变引入,设置其初始值为零,再使用最优化

的算法从而求出更精确的结果。

### 2.1.3 张氏标定法

张氏标定法同时考虑了径向与切向畸变，通过使用棋盘格作为标定物体，拍摄不同位置和角度的

棋盘格，得到完整的坐标信息，根据像点与物点之间的映射关系计算相机的径向和切向畸变系数及内外参数，具体求解原理如图所示：

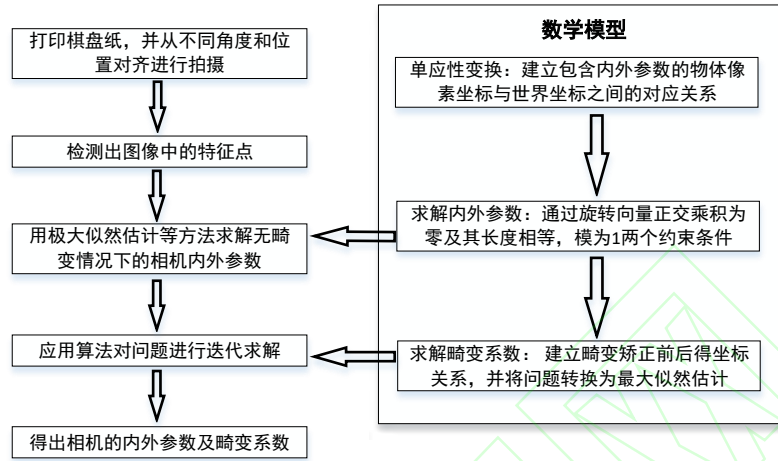


图 2 张氏标定法原理图

Fig.2 Schematic diagram of Zhang's calibration method

### 2.2 主动视觉相机标定法

主动视觉相机标定法通过利用相机或被测体的已知运动信息对相机进行标定，再线性求解相机的内外参数<sup>[11]</sup>，其特点是标定速度快，但精度相对传统标定低，常用的方法有基于相机纯旋转的标定<sup>[12]</sup>和基于平面正交运动的相机标定<sup>[13]</sup>等。

### 2.3 自标定方法

相机的自标定是通过在运动过程中建立多幅图像之间的对应关系，直接进行标定，其过程不需要使用标定物，常用的自标定法有基于 Kruppa 方

程的标定法、分层逐步标定法等。

#### 2.3.1 分层逐步标定法

分层逐步相机自标定方法是将摄像机自标定方法分成三部分并逐步计算出相机的参数，具体原理如下图 3 所示。

#### 2.3.2 基于Kruppa方程的自标定法

该方法直接找出图像之间的 Kruppa 方程的二次非线性约束，求解方程得出相机的内外参数，其具体过程如图 4。

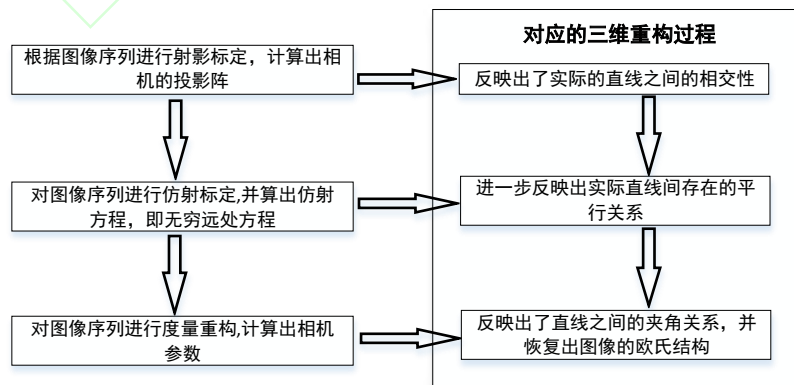


图 3 分层逐步标定原理图

Fig.3 Layered step-by-step calibration schematic

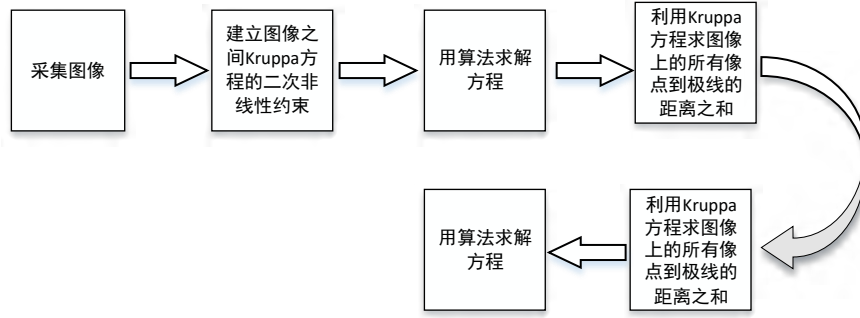


图 4 Kruppa 标定法原理图

Fig.4 Schematic diagram of the Kruppa calibration method

## 2. 4 相机标定方法总结

相机的传统标定法需要高精度标定物，标定过程复杂，但精度较高，应用于精度要求高的场合。其中，直接线性法的复杂度低，但精度低、鲁棒性差，Tsai 两步法的精度高、鲁棒性好，但复杂度高、速度慢，张氏标定法的复杂度低、精度高、鲁棒性好；主动视觉相机标定法标定的速度快、线性求解、计算简单、鲁棒性强，但标定时花费成本较高，适用于相机运动已知情况；相机自标定法灵活性强、计算量小，不需要外部三维信息，但标定的精度较低、过程复杂，适用于无已知参照物情形。其中基于 Kruppa 方程的自标定法的速度快，但精度低、鲁棒性差、复杂度高，分层逐步标定法的速度快，但精度低、鲁棒性差。

## 3 立体匹配算法

立体匹配可用来计算视差，从而获得深度信息，进行三维场景的重建<sup>[14]</sup>，根据匹配时算法的约束范围大体可以将立体匹配算法分为局部算法和全局算法两类<sup>[15]</sup>，下面将对两种方法进行介绍。

### 3. 1 局部立体匹配算法

局部立体匹配算法是通过使用图像的灰度信息进行匹配，只对像素周围小区域进行约束，从而独立匹配参考图像中的每个像素，如图像块匹配。它的能量函数没有平滑项，只有数据项，因此其只能求局部最优解<sup>[16]</sup>。

局部匹配算法相比于全局立体匹配算法的复杂度低、匹配时效性高，更适合硬件<sup>[17]</sup>，但其对匹配窗口的合理性依赖较大，对无纹理区域处理较差

<sup>[18]</sup>，目前局部立体匹配方法可以分为基于区域的匹配算法、基于特征的匹配算法和基于相位的匹配算法，其中基于区域的立体匹配算法通过随机选取左相机图像中的一个像素点为中心建立一个窗口，然后在右相机图像中寻找匹配度最高的窗口，两个对应窗口的中心像素点即为匹配点。它是最早开始研究的局部算法；基于特征的立体匹配算法根据图像的点、线段、边缘等图像特征进行匹配的，该类算法先提取特征信息，再由相似性准则进行匹配，获取视差信息；基于相位的立体匹配算法认为在左右相机的图片的像素点之间的局部相位是相等的，通过选取局部相位进行匹配，再加入约束条件实现图像匹配。

关于局部立体匹配算法的近年来研究进展有如 Kai<sup>[19]</sup>等针对传统局部块匹配算法在测量每个像素的成本函数时只考虑有限的区域，导致精度低的问题，提出了一种非基于参数的成本方法，它使用排名约束、梯度约束和相似性约束来测量像素成本，用多块匹配算法进行代价聚合，最后用 WTA 策略选择每个像素的视差值，算法可以在预定的局部窗口内提取具有更高成本的唯一性信息，实验验证该算法精度比传统局部块匹配算法精度高；Hu<sup>[20]</sup>等针对多光谱立体匹配存在非线性辐射失真等问题，提出了基于相位一致性和多局部同源异性的多光谱线段匹配算法，利用相位全等提取匹配的特征点，并融合原始红外图像的线段提取结果解决弱纹理问题，使用先前的多层单应性矩阵生成红外图像



表 1. 局部立体匹配算法的相关研究进展

Table 1: Research progress of local stereo matching algorithm

算法类别	作者	改进的问题	方法	优缺点
基于区域的立体匹配算法	Jiyang Qi 等 <sup>[21]</sup>	双目立体匹配时,在不连续区域和弱纹理区域存在匹配精度低和抗噪声差	基于改进的自适应支持窗的立体匹配算法	降低了不匹配率、提高了抗噪声性能,但未考虑算法的匹配速度
	Zihao Zhang 等 <sup>[22]</sup>	对给定支撑区域内对应像素分配更合理的权重系数	基于引力理论的加权算法	每个像素分配的权重系数更合理,但计算时间随着窗口的增大而迅速增加
	Chih-Shuan Huang 等 <sup>[23]</sup>	在光滑、闭塞和不连续区域出现的不可避免的误差	采用基于分段的超像素和匹配成本的立体匹配系统	改善不匹配的视差孔,更高的深度图精度,但匹配窗口的大小固定和匹配代价计算方法单一
基于特征的立体匹配算法	Xu Huang 等 <sup>[24]</sup>	有大几何畸变区域、弱纹理区域和重复纹理区域的特征匹配不确定性问题	一种具有空间平滑约束的鲁棒特征匹配方法	提高了相机在图像纹理、双目相机视角等因素限制下的匹配精度,但该方法增加了特征匹配的运行时间
	王笛等 <sup>[25]</sup>	针对特征匹配方法在视差连续处不平滑等问题	改进的特征立体匹配算法	提高了弱纹理区与深度不连续处的匹配效果以及整体视差精度,算法鲁棒性强,但算法的复杂度仍有待优化。
	Chong Aixin 等 <sup>[26]</sup>	针对平衡匹配方法的视差估计精度和推理速度问题	基于多层次特征提取器的准确快速立体匹配网络	模型的代价体积和参数量少,精度高,小物体视差估计效果差
基于相位的立体匹配算法	Yuan HUANG 等 <sup>[27]</sup>	对于结构数据获取时导致采集到的数据出现空洞问题	基于立体匹配技术与 b 样条相结合的孔洞填充方法	能对表面细节和复杂表面形状准确地还原,但对于缺乏纹理的对象,该方法并不是特别有效
	Hu Pengyu 等 <sup>[28]</sup>	结构光三维形状测量系统的实时性受到结构光投影图形数量的限制问题	基于三步移相图和散斑图组合投影的数字图像相关辅助相位匹配和三扫描快速精确三维形状测量方法	实现动态和变形物体的高速三维形状测量,但在重构曲面上有运动引起的波纹,缺少对相位误差的补偿
	Wong Alexander 等 <sup>[29]</sup>	针对基于相位的多模态图像配准方法计算成本高问题	基于相位的快速多模态图像配准方法	计算速度提高,但只对初始粗粒度配准有效

的映射线段的多层堆栈，并根据线位置编码方案、重叠约束、点到线距离约束和总评估，正确匹配率可以达到 94%，其他研究如表 1 所示。

从表中我们能看出，基于区域的匹配算法重点研究改进窗口的问题和弱纹理区域的匹配问题，这也是该类算法的缺点，即窗口的大小选择难、在弱纹理区域匹配效果差等，但该类算法运算简单；基于特征的立体匹配算法重点研究解决弱几何特征问题，这是该算法的一大缺点，即该类算法对于几

何特征明显的图像匹配效果比较好，时间复杂度低，但对几何特征弱的图像匹配效果差，且若要获得稠密的立体图则需要进行相应的差值计算；基于相位的立体匹配算法能更好的还原三维物体的细节信息，且其速度快，但该类算法在寻找等相位点时较为困难。

### 3.2 全局立体匹配算法

全局立体匹配算法先通过图像中的特征点、线或扫描线进行匹配得到初始视差值，之后通过匹配

表 2. 全局立体匹配的相关研究进展

Table 2: Progress of research related to global stereo matching

算法类别	作者	改进的问题	方法	优缺点
基于动态规划的立体匹配算法	Zakaria Kerkaou等 <sup>[30]</sup>	自动驾驶立体匹配问题	基于时间信息和支持向量积的立体匹配	匹配速度快，但数据维度大于样本维度时表现差
	Wu等 <sup>[31]</sup>	针对AD-Census算法抗噪性差的问题	将增强的人口普查变换与单向动态规划优化相结合的匹配方法	算法的抗噪性提高，但算法的实时性、稳定性差
	Zhiyong Peng等 <sup>[32]</sup>	金字塔SGM算法耗时长、内存消耗高、视差搜索范围未知等问题	一种基于稀疏局部特征匹配和一维动态规划的初始视差估计算法	与传统SGM比视差的搜索范围小，精度高、速度快，但不适合在 CPU 上进行快速运行
基于图割法的立体匹配算法	Hua Li等 <sup>[33]</sup>	使获得左右视图的超像素分割结果更协调一致	提出了一种用于立体超像素分割的左右交互优化框架	一致性和准确性较好，但初始无监督方法的性能一定程度上受到限制，降低了分割精度
	Zhihui Li等 <sup>[34]</sup>	卫星遥感图像中的物体存在较大变形，匹配难度大的问题	一种基于平面分割结果的视差细化方法	填补了缺失匹配，降低了仰角误差，但依赖于视差精度，当视差孔较大时则误差大
	马瑞浩等 <sup>[35]</sup>	为降低立体匹配时所有区域的误匹配率	一种基于图像分割的稠密立体匹配算法	视差图的误匹配降低，但纹理弱的区域的匹配精低
基于置信传播的立体匹配算法	Sunok Ki等 <sup>[36]</sup>	匹配成本、视差和彩色图像输入的置信度	通过深度网络估计三模态输入的置信度	简单的网络条件准确性较好，但复杂网络的准确性差
	Matteo Poggi等 <sup>[37]</sup>	在飞行时传感器和立体视觉系统两种情况下如何估计探测深度数据的可靠性问题	一种适用于传感器和立体传感器产生的深度数据的置信度估计策略	该方案优于最先进的数据融合方案，但尚未应用于视频序列
	Xu Chenglong 等 <sup>[38]</sup>	辐射变化导致基于立体视觉的匹配等任务	一种新的立体强度对齐和图像增强方法	该方法显著增强了立体图像的纹理信息，进一步提高

算法,以全局能量函数最小化为目标进行不断迭代,寻找最优值<sup>[39]</sup>,该类算法精度高,但算法复杂,效率低,实时性差<sup>[40]</sup>,目前全局立体匹配算法可以分为基于动态规划的算法、信念传播算法和基于图形切割的算法<sup>[14]</sup>等,其中基于动态规划的立体匹配算法是将问题分解,并求解每个子问题从而得到问题的解。由于子问题很类似,动态规划对每个问题进行计算并将解保存,当再次求解相同问题时直接进行查找,从而使计算量变少;基于图割法的立体匹配算法是将图像按照其结构特性分为不同区域,并以能量函数最小为目标,对这些区域进行求解,最终实现立体匹配,这使得图割法既能实现全局最优,又能保留图像本体的结构信息;基于置信传播的立体匹配算法需要构造马尔可夫网络,马尔可夫随机场中的节点与图像像素点一一对应,节点之间的最大化置信度是通过消息传输机制保证,从而使得马尔可夫随机场的概率分布为最大,间接保证了全局能量函数最小。

关于全局立体匹配算法的近年来研究进展有如 Hossein<sup>[41]</sup>等为使像素的颜色信息在置信传播算法中产生更好的效果,利用基于强度差的符号和排序改进局部对比度和排序描述符来处理照明变化、深度不连续性问题,并将其与像素的颜色信息相结合,作为置信传播算法的数据函数,提出了一种局部符号和排序匹配算法,该算法在无纹理和深度不连续区域和背景中结果非常好,其余如表 2 所示。

从表中我们可以看出基于动态规划的立体匹配算法的时间复杂度低,在弱纹理和深度不连续的区域也能实现良好的匹配,但该类算法视差图中的条纹现象明显;基于图割法的立体匹配算法精度高,收敛速度快,但其计算时间长,实时性差;基于置信传播的立体匹配算法,时间复杂度比较高,但其对弱纹理区问题处理较好。

## 4 避障算法

无人机自主避障算法目前可以分为两类:全局避障算法和局部防碰撞算法<sup>[42]</sup>,其中全局避障算法

的原理是在环境及障碍物已知的情况下,寻找一条从起点到终点并能避开所有障碍物的最短路径;局部防碰撞算法的原理是根据传感器收集到的实时三维环境信息进行避障,该类算法不需要知道起点和目标点的信息,多用于动态障碍或突发状况<sup>[43]</sup>。

关于避障算法的近年来研究进展有如 Liu<sup>[44]</sup>等为了生成无人机无障碍物碰撞的高质量路径,提出了一种基于切线相交和目标引导策略的新型自主路径规划算法,该算法在目标的引导下,沿着椭圆切线生成两条子路径,子路径在遇到障碍物根据启发式规则进行选择,以不断避开障碍物,直至目标,并采用三次 B 样条曲线对航点进行平滑处理,该算法可在短时间内生成无障碍物的路径;Zhang<sup>[45]</sup>等针对多无人机协同编队的三维空间轨迹规划问题,采用基于编队控制匈牙利算法,最小化编队变换过程中轨迹总距离的代价,提出了飞行高度的四维时空层次分解策略,避免编队飞行过程中的碰撞,该算法的总航程与时间比传统算法显著减少。下面将分别介绍两种避障方法中的一些典型算法。

### 4.1 全局避障算法

目前,全局避障算法主要包括有 A\*搜索算法、RRT 算法和粒子群算法等,其中 A\*算法属于图类算法,当其规划起点到终点的路径时,首先将地图划分成网栅格的形式,通过计算无人机当前位置与起始点距离及与目标点距离之和作为代价函数,将代价函数最小的节点放在 open 列表执行,执行后放入 close 列表,不断进行循环计算,直至到目标点;RRT 算法以出发点开始,通过随机增加节点生成随机扩展树,将遇到障碍物的节点被舍弃,从而进行空间所搜,直到将目标点包含在内,结束所搜;粒子群算法是通过模仿鸟类觅食行为,每只鸟都可能找到食物,对应每个粒子都有可能解,以距离与碰撞系数乘积的倒数作为代价函数,将代价函数大的粒子淘汰,并在新的范围随机产生新个体,不断迭代,直至最优。从三种算法的原理上我们可以得出各自的优缺点:A\*算法计算复杂度低、速度快,但是仅能用于静态避障,RRT 算法可以处理复杂环境



的避障、规划速度快，但其路径与最优路径可能距离较远，粒子群算法路径优化的好，但是运算时间长，算法需要的存储空间大。基于以上各自的优缺点，近年来基于这三种全局避障算法的部分改进情况如下表 3 所示。

点，近年来基于这三种全局避障算法的部分改进情况如下表 3 所示。

表 3. 全局避障算法部分相关研究进展

Table 3. Progress of research related to global obstacle avoidance algorithm part

算法类别	作者	问题	方法	优缺点
改进 A*搜索算法	Lan Ma 等 <sup>[46]</sup>	有效减少火山灰区对民航飞行的安全威胁	利用最优互反避碰撞 (ORCA) 的速度矢量思想，提出一种改进的 a 星算法	搜索节点少、搜索范围小、搜索速度快，但未考虑油耗、飞行时间等约束
	Zhibo He 等 <sup>[47]</sup>	对复杂的多船只防碰撞问题	一种 DAA 星算法	有效地避免动态干扰，计算时间短，但未考虑船模自身的姿态等因素
	Jing Zhang 等 <sup>[48]</sup>	自动驾驶汽车路径规划问题	一新启发式函数来改进广泛使用的 a - star 算法	适用于障碍物较多的环境，减少了不必要的拐点，但算法比较复杂
改进 RRT 算法	Juan Li 等 <sup>[49]</sup>	未知三维环境下的目标搜索与拦截问题的路径规划	RRT 算法与滚动规划和节点筛选相结合的算法	有效减少节点数量，缩短路径长度，但算法规划不稳定导致搜索效率低的问题仍然存在
	Dong Wang 等 <sup>[50]</sup>	矿区矿用卡车的路径规划	一种改进的双向 RRT*算法	解决了 RRT 算法中收敛性、稳定性差等问题，但对车辆的动态变化控制差，实时性弱
	Je-Kwan Park 等 <sup>[51]</sup>	针对无人机在三维环境中的避碰和路径重新规划问题	一种新的边界 RRT*算法	减少计算负载，并能在短时间内确定最优避碰路径，但可生成不可达路径
改进粒子群算法	Hongyue Chu 等 <sup>[52]</sup>	针对无人机在三维环境中多重威胁的安全路径规划问题	基于逻辑混沌映射的速度和改进的非线性动态惯性权重 PSO 算法	收敛速度快、初始化时间短、路径光滑，但未考虑动态障碍的影响，约束少
	Shasha Tian 等 <sup>[53]</sup>	动态环境下多机器人路径规划的实时性和准确性问题	一种跳跃机制粒子群优化算法 (JPSO) 和一种安全间隙避障算法 (SGOA)	算法的收敛速度快、精度高，但 JPSO 牺牲了收敛速度来提高全局搜索性能，SGOA 在碰撞过多时失效
	Wenjian He 等 <sup>[54]</sup>	复杂三维环境下多架无人机的协调路径规划问题	采用时间戳分割模型并结合改进粒子群优化和改进的共生生物搜索，提出了一种新的混合算法 HIPSOMSOS	精度、收敛速度和稳定性等方面有明显的优势，但无法避免与环境中的动态障碍物发生碰撞

4.2 局部防碰撞算法

局部防碰撞算法主要包括人工势场法、基于制导律法、动态窗口法等，其中人工势场法通过模拟力场常来进行避障，障碍物产生斥力、目标点产生引力，并通过构建引力与无人机到目标点距离成正比、斥力与无人机到障碍物距离成反比的方程式，计算两合力并使无人机沿两合力最大方向行进，直

至到达目标点；基于制导率法是将无人机探测到关于障碍物的信息进行整合，并将障碍物用圆及其组合方式代替，当无人机接近障碍物时，切换制导律，改变无人机的方向，并计算其速度，离开障碍物后，使用原制导律，继续跟踪原航路，不断重复此过程，直至目标点为止；动态窗口法是通过计算无人机下一时刻的速度及角速度的上下界为范围建立一个

表 4. 局部防碰撞算法部分相关研究进展

Table 4. Progress of research related to local collision avoidance algorithm section

算法类别	作者	问题	方法	优缺点
改进人工势场法	ZhiboHe 等 <sup>[55]</sup>	船舶运动规划问题	一种考虑防撞规则的复杂遭遇场景的模型预测人工势场的运动规划方法	能够避开多船遭遇情况下的静态和动态障碍物，但未考虑环境干扰等情况
	Sivaranjani 等 <sup>[56]</sup>	移动机器人的自主导航问题	利用深度 Q 网络和人工势场算法的最佳路径预测法	减少了路径规划时间和收敛时间，增加了有效目标的数量，但仅限于静态场景
	Wang Ning 等 <sup>[57]</sup>	针对无人机编队在三维障碍物环境中避障和位置、速度一致性问题	提出了一种基于改进人工势场和一致性理论的分布式协同编队避障控制算法	实现避碰、避障、编队恢复、位置和速度一致等多个控制目标，但未考虑通信延迟
改进基于制导律算法	Jin Xiaozhao 等 <sup>[58]</sup>	无人水面飞行在复杂海洋环境下抢救目标的合作路径规划问题	一种新型的多重约束下救援 USV 协同遍历路径规划方案	可划分更多的障碍物区域，可处理外部干扰等，但未考虑动态目标等
	兰庆湘等 <sup>[59]</sup>	针对存在外部扰动的无人机避障问题	一种基于模型预测的抗干扰避障制导方法	能够规避飞中的障碍物，有一定的抗干扰能力，但 MPC 解算时间长等，使干扰估计误差存在一定的波动
	魏瑞轩等 <sup>[60]</sup>	针对无人机避障问题	一种无人机障碍规避制导控制方法	适用于几何形状不规则的多种障碍，但切换制导律频繁
改进动态窗口法	Jungho Moon 等 <sup>[61]</sup>	针对垂直起降无人机的障碍物避碰问题	一种混合动态窗口方法	该算法能在复杂环境快速避开障碍，但仍是局部规划
	Tagor Hossain 等 <sup>[62]</sup>	在动态环境下移动机器人的避障问题	将动态窗口与改进的跟随间隙法相结合，提出了一种新的局部算法	该算法能够生成安全、快速的避碰轨迹，但只适用于速度较低的机器人
	Zhao Shengwu 等 <sup>[63]</sup>	较长的路径可能遇到不可预测问题	一种结合改进的 A*算法和改进的 DWA 算法的全局动态路径规划算法	该算法能够实现水下航行器的无障碍导航，但不能适用于三维场景

窗口，并预测出无人机的下一时刻位置范围及与障碍物距离，再选出最佳位置，控制无人机移动到此位置后，再对下一时刻无人机位置范围进行预测及估算与障碍物的距离，以此循环往复，直到到达目标点。从原理可以看出三种算法各自的优缺点如下：人工势场法的计算量小、规划速度快，但存在局部最优及避障失败情况；基于制导律法计算简单，考虑的约束多，但需要频繁切换制导律；动态窗口法结构简单、避障能力好，但存在容易陷入局部最优、对三维场景适用性差等问题。近年来围绕三种局部避障算法的部分相关研究如表 4 所示。

## 5. 未来方向

随着 5G 等新兴技术的普及，无人机避障技术将更加成熟，然而从目前研究现状看，无人机双目视觉避障技术仍有待探索，本章将对其未来发展趋势与面临的挑战进行简要分析和总结。

### 5.1 相机标定技术

对于视觉避障技术而言，相机标定的精度直接影响后期避障的效果，针对上述标定方法的不足，未来的一些发展趋势展望如下：（1）标定算法本身存在标定精度低、速度慢等问题，可将相机标定方法与深度学习<sup>[64]</sup>等技术相结合，从而对标定算法进行优化；（2）目前，相机模型存在不同的特点，可结合各相机模型的优点对相机模型进行优化，从而提升标定精度；（3）标定过程中存在人工干预带来的误差，可引入自动控制方法，减少人工干预的误差或实现无人工干预。

### 5.2 立体匹配算法

立体匹配算法能够还原三维场景，这对无人机实现自主避障是至关重要的，针对目前的研究现状，未来立体匹配算法可做出如下改善：（1）匹配模型仍存在参数多、参数选择困难等问题，可结合轻量化技术对立体匹配算法进行改进<sup>[65]</sup>，减少模型参数、提高立体匹配的速度；（2）匹配算法的鲁棒性和精度等方面仍有待改善，可结合图卷积<sup>[66]</sup>等最新视觉技术对匹配算法进行优化。

### 5.3 避障算法

避障算法是无人机能否实现避障的关键，通过避障算法可以极大缩短总航行时间，是使得无人机快速、精准实现任务的关键。针对目前避障算法存在的问题可做出如下改善：（1）避障算法存在将无人机考虑成质点等问题，使得避障的航程增加，未来在避障算法中可以融入控制部分，将无人机的姿态、大小等约束条件也考虑在内，从而使避障效果更佳，路径更短（2）多机作业时存在因一架作业失败产生链式反应，使得整体作业失败等问题，可融入容错<sup>[67]</sup>、协同控制等控制技术，提升机群的抗干扰等能力；（3）避障算法本身存在的不同的优缺点，避障算法融合方面仍需不断探索，从而对算法改进，提高算法的实时性、准确性。

### 5.4 通讯与硬件方面

目前无人机自主避障技术在通讯与硬件方面仍可做出如下改善：（1）应用 5G 等技术，解决通讯的实时性和多机协同通信差等问题；（2）多无人机通讯存在信息量大，容易造成通讯延迟等问题，结合边缘计算<sup>[68]</sup>等技术减小中心服务器的计算量，从而提升通讯速度（3）提高硬件的精度和软硬件的兼容性，从而提高无人机的反应速度及避障的准确。

## 6 结束语

本文介绍了基于双目视觉的无人机自主避障系统结构，重点介绍了相机标定方法、立体匹配算法和避障算法 3 个方面的相关研究，并对这 3 个方面的优缺点进行了总结，最后对双目视觉的无人机自主避障技术的未来发展做了展望，并提出一些可供参考的研究方向。

## 参考文献

- [1] Mao X, Xiang B, Liu Z, et al. Simulation analysis and experimental research on the safety distance of UAV inspection on transmission lines[J]. Aip Advances, 2022, 12(2). <https://doi.org/10.1063/5.0083674>.
- [2] Kim H J, Hyun-kwon N, Hwan K T. Discriminant analysis to detect fire blight infection on pear trees using rgb imagery obtained by a rotary wing drone[J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2020, 47(2): 349-360.
- [3] 任梦洁,郭佳晖.小型攻击型四旋翼无人机系统设计[J].电光与控制,2017,24(11):88-90+99.
- [4] 李安醴,武丁杰,李诚龙.低空无人机自主避障算法综述[J].电光与控制,2021,28(08):59-64.

- [5] Zhang M Y, Cai W Y, Xie Q A, et al. Binocular-vision-based obstacle avoidance design and experiments verification for underwater quadrocopter vehicle[J]. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 2022, 10(8):1050.
- [6] Fu Z J, Zhi Y Y, Ji S L, et al. Remote attacks on drones vision sensors: an empirical study[J]. *Ieee Transactions On Dependable and Secure Computing*, 2022, 19(5): 3125-3135.
- [7] Marshall J A, Sun W, L'Afflitto A. A survey of guidance, navigation, and control systems for autonomous multi-rotor small unmanned aerial systems[J]. *Annual Reviews In Control*, 2021, 52: 390-427.
- [8] Wang L, Lan Y, Zhang Y, et al. Applications and prospects of agricultural unmanned aerial vehicle obstacle avoidance technology in china[J]. *sensors*, 2019, 19(3): 642.
- [9] 陈洪攀.基于毫米波雷达与单目视觉融合的无人机自主避障系统[D].西安电子科技大学,2018.
- [10] Dong Q, Wang L, Feng J. Confidence-based camera calibration with modified census transform[J]. *Multimedia Tools And Applications*, 2020, 79(31-32): 23093-23109.
- [11] 吴福朝,李华,胡占义.基于主动视觉系统的摄像机自标定方法研究[J].*自动化学报*,2001(06):752-762.
- [12] Wang L, Kang S B, Shum H Y, et al. Error analysis of pure rotation-based self-calibration.[J]. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(2): 275-280.
- [13] 李华,吴福朝,胡占义.一种新的线性摄像机自标定方法[J].*计算机学报*,2000(11):1121-1129.
- [14] Ma X, Zhang Z C, Wang D F, et al. Adaptive deconvolution-based stereo matching net for local stereo matching[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(4): 2086.
- [15] Kerkaou Z, El Ansari M, Masmoudi L, et al. Dense spatio-temporal stereo matching for intelligent driving systems[J]. *Iet Image Processing*, 2021, 15(3): 715-723.
- [16] Yoon K J, Kweon I S. Locally adaptive support-weight approach for visual correspondence search[J]. *IEEE Computer Society*, 2005, 2: 924-931.
- [17] Ling Y H, He T, Meng H T, et al. Hardware accelerator for an accurate local stereo matching algorithm using binary neural network[J]. *Journal Of Systems Architecture*, 2021, 117:102110.
- [18] Chen S, Zhang J, Jin M. A simplified ica-based local similarity stereo matching[J]. *Visual Computer*, 2021, 37(2): 411-419.
- [19] Kok K Y, Rajendran P. A local multi-block with various constraints approach for stereo vision in StereoPi[J]. *Measurement*, 2022, 200:111617.
- [20] Hu H, Li B, Yang W, et al. A novel multispectral line segment matching method based on phase congruency and multiple local homographies[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16):3857.
- [21] Qi J Y, Liu L. The stereo matching algorithm based on an improved adaptive support window[J]. *Iet Image Processing*, 2022, 16(10): 2803-2816.
- [22] Zhang Z H, Wang Y Q, Huang T, et al. A weighting algorithm based on the gravitational model for local stereo matching[J]. *Signal Image And Video Processing*, 2020, 14(2): 315-323.
- [23] Huang C S, Huang Y H, Chan D Y, et al. Shape-reserved stereo matching with segment-based cost aggregation and dual-path refinement[J]. *Eurasip Journal On Image And Video Processing*, 2020, 38: 1-19.
- [24] Huang X, Wan X, Peng D F. Robust feature matching with spatial smoothness constraints[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3158-3165.
- [25] 王笛,胡辽林.基于双目视觉的改进特征立体匹配方法[J].*电子学报*,2022,50(01):157-166.
- [26] Chong A, Yin H, Liu Y, et al. Multi-hierarchy feature extraction and multi-step cost aggregation for stereo matching[J]. *Neurocomputing*, 2022, 492: 601-611.
- [27] Huang Y, Da F. Three-dimensional face point cloud hole-filling algorithm based on binocular stereo matching and a B-spline[J]. *Frontiers Of Information Technology & Electronic Engineering*, 2022, 23(3): 398-408.
- [28] Hu P Y, Yang S M, Zhang G F, et al. High-speed and accurate 3d shape measurement using dic-assisted phase matching and triple-scanning[J]. *Optics and Lasers In Engineering*, 2021, 147: 106725.
- [29] Wong A, Fieguth P. Fast phase-based registration of multimodal image data[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(5): 724-737.
- [30] Kerkaou Z, El Ansari M. Support vector machines based stereo matching method for advanced driver assistance systems[J]. *Multimedia Tools And Applications*, 2020, 79(37-38): 27039-27055.
- [31] Wu X, Lian H, Bao X, et al. Using Enhanced Reordered Census Transform for Semiglobal Stereo Matching Algorithm[J]. *Mobile Information Systems*, 2022, 2022: 4685700.
- [32] Peng Z Y, Wu L, Xiao B. High-speed dense matching algorithm for high-resolution aerial image based on cpu-fpga[J]. *Visual Computer*. <https://doi.org/10.1007/s00371-022-02658-0>.
- [33] Li H, Cong R, Kwong S, et al. Stereo superpixel: An iterative framework based on parallax consistency and collaborative optimization[J]. *Information Sciences*, 2021, 556: 209-222.
- [34] Li Z, Liu J, Yang Y, et al. A disparity refinement algorithm for satellite remote sensing images based on mean-shift plane segmentation[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1903.
- [35] 马瑞浩,朱枫,吴清潇,鲁荣荣,魏景阳.基于图像分割的稠密立体匹配算法[J].*光学学报*,2019,39(03):240-248.
- [36] Kim S, Kim S, Min D, et al. Stereo confidence estimation via locally adaptive fusion and knowledge distillation.[J]. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 2022, PP. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3207286>.
- [37] Poggi M, Agresti G, Tosi F, et al. Confidence estimation for tof and stereo sensors and its application to depth data fusion[J]. *Ieee Sensors Journal*, 2020, 20(3): 1411-1421.
- [38] Xu C, Du Z, Yan Z, et al. Stereo-IA: stereo visual intensity alignment and beyond under radiation variation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11424-11443.
- [39] Zhang K, Lu J, Lafruit G. cross-based local stereo matching using orthogonal integral images[J]. *Ieee Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, 2009, 19(7): 1073-1079.
- [40] Lu Z M, Wang J, Li Z W, et al. A resource-efficient pipelined architecture for real-time semi-global stereo matching[J]. *Ieee Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, 2022, 32(2): 660-673.
- [41] Karimi H, Dolati A, Layeghi K. Stereo matching by using a new local descriptor based on sign and order in belief propagation algorithm[J]. *Displays*, 2022, 75: 102300.
- [42] Ahmed S, Qiu B, Ahmad F, et al. A state-of-the-art analysis of obstacle avoidance methods from the perspective of an agricultural sprayer uav's operation scenario[J]. *Agronomy-Basel*, 2021, 11(6): 1069.
- [43] Marin-Plaza P, Hussein A, Martin D, et al. Global and local path planning study in a ros-based research platform



- for autonomous vehicles[J]. *Journal Of Advanced Transportation*, 2018: 6392697.
- [44] Liu H, Li X, Fan M, et al. An autonomous path planning method for unmanned aerial vehicle based on a tangent intersection and target guidance strategy[J]. *Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(4): 3061-3073.
- [45] Zhang J, Sheng H, Chen Q, et al. A four-dimensional space-time automatic obstacle avoidance trajectory planning method for multi-uav cooperative formation flight[J]. *Drones*, 2022, 6(8): 192.
- [46] Ma L, Zhang H, Meng S, et al. Volcanic ash region path planning based on improved a-star algorithm[J]. *Journal Of Advanced Transportation*, 2022, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9938975>.
- [47] He Z, Liu C, Chu X, et al. Dynamic anti-collision A-star algorithm for multi-ship encounter situations[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 118: 102995.
- [48] Zhang J, Wu J, Shen X, et al. Autonomous land vehicle path planning algorithm based on improved heuristic function of A-Star[J]. *International Journal Of Advanced Robotic Systems*, 2021, 18(5). <https://doi.org/10.1177/17298814211042730>.
- [49] Li J, Li C Y, Chen T, et al. Improved rrt algorithm for auv target search in unknown 3d environment[J]. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 2022, 10(6): 826.
- [50] Wang D, Zheng S T, Ren Y X, et al. Path planning based on the improved rrt algorithm for the mining truck[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2022, 71(2): 3571-3587.
- [51] Park J K, MYOUNG C T A I. Boundary-rrt\* algorithm for drone collision avoidance and interleaved path re-planning[J]. *Journal of Information Processing Systems*, 2020, 16(6): 1324-1342.
- [52] Chu H, Yi J, Yang F. Chaos particle swarm optimization enhancement algorithm for uav safe path planning[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(18): 8977.
- [53] Tian S, Li Y, Kang Y, et al. Multi-robot path planning in wireless sensor networks based on jump mechanism PSO and safety gap obstacle avoidance[J]. *Future Generation Computer Systems-The International Journal Of Escience*, 2021, 118: 37-47.
- [54] He W, Qi X, Liu L. A novel hybrid particle swarm optimization for multi-UAV cooperate path planning[J]. *Applied Intelligence*, 2021, 51(10): 7350-7364.
- [55] Dai J, Qiu J, Yu H, et al. Robot static path planning method based on deterministic annealing[J]. *Machines*, 2022, 10(8): 600.
- [56] Sivaranjani A, Vinod B. Artificial potential field incorporated deep-q-network algorithm for mobile robot path prediction[J]. *Intelligent Automation And Soft Computing*, 2023, 35(1): 1135-1150.
- [57] Wang N, Dai J, Ying J. UAV Formation obstacle avoidance control algorithm based on improved artificial potential field and consensus[J]. *International Journal Of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(6): 1413-1427.
- [58] Jin X Z, Er M J. Cooperative path planning with priority target assignment and collision avoidance guidance for rescue unmanned surface vehicles in a complex ocean environment[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 52: 101517.
- [59] 兰庆湘,陈谋,雍可南.多旋翼无人机模型预测抗扰避障制导[J].*国防科技大学学报*, 2022, 44(04): 32-42.
- [60] 魏瑞轩,周凯,王树磊,等.面向未知环境的无人机障碍规避制导律设计[J].*系统工程与电子技术*, 2015, 37(09): 2096-2101.
- [61] Moon J, Lee B Y, Tahk M J. A hybrid dynamic window approach for collision avoidance of vtol UAVS[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2018, 19(4): 889-903.
- [62] Hossain T, Habibullah H, Islam R, et al. Local path planning for autonomous mobile robots by integrating modified dynamic-window approach and improved follow the gap method[J]. *Journal Of Field Robotics*, 2022, 39(4): 371-386.
- [63] Zhao S W, Shi L, Zhang W Z, et al. Global dynamic path-planning algorithm in gravity-aided inertial navigation system[J]. *Iet Signal Processing*, 2021, 15(8): 510-520.
- [64] Zhang J, Luo B, Xiang Z, et al. Deep-learning-based adaptive camera calibration for various defocusing degrees[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5537-5540.
- [65] Xue Y, Zhang D, Li L, et al. Lightweight multi-scale convolutional neural network for real time stereo matching[J]. *Image and Vision Computing*, 2022, 124: 104510.
- [66] Ma Q, Jiang G, Wu J, et al. WGLSM: An end-to-end line matching network based on graph convolution[J]. *Neurocomputing*, 2021, 453: 195-208.
- [67] Hu J, Niu H, Carrasco J, et al. Fault-tolerant cooperative navigation of networked UAV swarms for forest fire monitoring[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107494.
- [68] Miao Y, Hwang K, Wu D, et al. Drone swarm path planning for mobile edge computing in industrial internet of things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022.