

## 特约论文



薛伟 博士、副教授、硕士生导师, 现任安徽工业大学计算机科学与技术学院副院长。兼任医学影像建模与智能分析马鞍山市重点实验室副主任, *Statistics, Optimization and Information Computing* 编委以及《安徽工业大学学报(自然科学版)》青年编委。2019年7月至2021年9月在国防科技大学信息与通信工程学科从事博士后研究工作, 主要研究方向为机器学习理论与算法及其在计算机视觉、机器视觉、医学图像处理及遥感图像处理等领域的交叉应用。主持国家自然科学基金项目、中国博士后科学基金项目、国防基础科研项目、安徽省自然科学基金项目、安徽省高等学校科研计划项目及 ATR 国防科技重点实验室基金项目等科研课题。在 *IEEE TNNLS*、*IEEE J-STARS*、*IEEE J-MASS*、*IJMLC* 等期刊发表学术论文 20 余篇, 获安徽省教学成果一等奖、二等奖各 1 项, 且获 ISICA2024 最佳论文奖。

## 基于 $\ell_1$ 范数与梯度约束的无人机图像拼接方法

李柔, 薛伟

(安徽工业大学 计算机科学与技术学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 无人机图像拼接技术通过高效整合航拍数据, 为低空经济发展提供重要支撑。针对低纹理场景下无人机图像特征点提取不足导致的配准精度下降、拼接错位以及重影等问题, 提出一种基于 $\ell_1$ 范数与梯度约束的无人机图像拼接方法。首先, 通过联合提取目标图像与参考图像的特征点和特征线, 构建多特征描述子以提升匹配鲁棒性, 有效改善图像错位问题。其次, 采用 $\ell_1$ 范数进行色差度量并结合梯度约束构建能量函数, 引导接缝优先通过图像高相似度的连续区域; 最后, 基于图切割算法在重叠区域搜索最优缝合路径, 并采用泊松融合技术实现拼接边界的自然过渡。选取两组典型无人机图像数据集, 通过与 SPW, LPC 和 MSF 3 种主流方法的对比测试, 验证本文方法在拼接精度和视觉效果上的优势。结果表明: 相较于 SPW, LPC 和 MSF 方法, 本文方法在客观指标上优势显著, 其 SSIM 值分别提高 2.97%, 5.87%, 3.07%, PSNR 值分别提高 0.595, 0.848, 0.841 dB; 在主观视觉质量方面, 本文方法有效缓解了拼接错位和重影问题, 同时更好地保持了图像结构和纹理细节的完整性。定量和定性结果共同证实了该方法在低纹理场景下的优越性能。

**关键词:** 无人机影像; 图像拼接; 多模态; 特征匹配; 范数约束; 梯度优化; 图切割; 泊松融合

**中图分类号:** TP 391.41 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25019



收稿日期: 2025-03-01

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重大项目(2023AH040149); 安徽省自然科学基金面上项目(2208085MF168)

作者简介: 李柔(1999—), 女, 安徽宿州人, 硕士生, 主要研究方向为图像处理。

通信作者: 薛伟(1986—), 男, 江苏南通人, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习与计算机视觉。

引文格式: 李柔, 薛伟. 基于 $\ell_1$ 范数与梯度约束的无人机图像拼接方法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(4):392-400.

# UAV Image Stitching Method Based on $\ell_1$ -norm and Gradient Constraints

LI Rou, XUE Wei

(School of Computer Science & Technology, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV) image stitching technology provides crucial support for the development of the low-altitude economy through efficient integration of aerial data. To address issues such as low registration accuracy, misalignment, and ghosting caused by insufficient feature point extraction in low-texture UAV images, an  $\ell_1$ -norm and gradient-constrained UAV image stitching method was proposed. First, feature points and feature lines of the target image and the reference image were jointly extracted to construct a multi-feature descriptor, enhancing matching robustness and effectively improving image misalignment. Second, the  $\ell_1$ -norm was used for color difference measurement, and an energy function was constructed with gradient constraints to guide the seam to preferentially pass through highly similar continuous regions. Finally, the graph-cut algorithm was applied to search for the optimal stitching path in the overlapping area, and Poisson blending was employed to achieve a natural transition at the stitching boundary. Two sets of typical drone image datasets were selected, and comparative tests with three mainstream methods (SPW, LPC, and MSF) were conducted to verify the superiority of the proposed method in terms of stitching accuracy and visual effects. The results show that compared with SPW, LPC, and MSF, the SSIM values of the proposed method are improved by 2.97%, 5.87%, and 3.07% respectively, while the PSNR values are increased by 0.595, 0.848, 0.841 dB respectively. In terms of visual effects, misalignment and ghosting during the stitching process are significantly improved by the proposed method, with structural integrity and texture details of objects being better preserved, resulting in enhanced overall quality of UAV image stitching. Both quantitative and qualitative analyses fully demonstrate the superior performance of the proposed method in low-texture scenarios.

**Keywords:** UAV imagery; image stitching; multimodal; feature matching; norm constraints; gradient optimization; graph cut; Poisson fusion

随着低空经济上升为国家战略性新兴产业,无人机技术在物流运输、生态保护、基础设施巡检等领域展现出巨大应用潜力。作为低空经济的重要数据支撑,无人机图像拼接技术通过将多视点影像融合为全景图,为路径规划<sup>[1]</sup>、生态监测<sup>[2]</sup>、智能巡检<sup>[3]</sup>等关键场景提供高精度空间信息。然而,在低纹理、弱光照等复杂环境下,传统拼接方法因特征匹配鲁棒性不足,易导致配准偏差与拼接伪影,直接影响后续分析的准确性。针对这一技术瓶颈,研究具有强适应性的无人机图像拼接算法,实现几何结构对齐与色彩过渡平滑,对提升低空经济数据服务能力具有重要的工程价值。

从方法论的视角来看,图像拼接技术主要遵循两大技术路径:空间变换翘曲与接缝驱动方法。其中,空间变换翘曲方法通过将目标图像划分为若干子区域,分别计算各区域的局部单应性矩阵,并基于能量优化实现图像对齐。学者们相继提出了单应性矩阵变形<sup>[4]</sup>、单视角变形<sup>[5]</sup>和线点一致性<sup>[6]</sup>等代表

性方法,这些方法虽能有效缓解投影变形和错位问题,但在处理视差图像时易引入视觉伪影且难以有效保持场景几何一致性。针对视差图像拼接的挑战,研究者们提出了多种解决方案。孙商文等<sup>[7]</sup>通过特征优化与最优接缝搜索相结合的策略,有效降低了误匹配和重影现象;Nie等<sup>[8]</sup>开发的视差容忍无监督拼接技术有效减少了视差伪影;陈珺等<sup>[9]</sup>提出的半投影翘曲算法在无人机图像拼接中展现出优异的错位抑制能力;Li等<sup>[10]</sup>采用多尺度特征匹配与局部单应性变换相结合的方法,成功改善了大视差场景下的几何变形问题。这些方法从不同角度推动了图像拼接技术的发展。其中,接缝驱动方法通过优化重叠区域的接缝路径来提升拼接质量。该领域的主要研究进展包括:Lin等<sup>[11]</sup>提出的自适应特征加权方法显著提升了接缝质量与结构保持效果;Li等<sup>[12]</sup>通过引入人类视觉感知函数有效缓解视差重影;Liao等<sup>[13]</sup>基于迭代接缝估计的质量评估方法优化了视觉效果;Cao等<sup>[14]</sup>提出的基于人眼视觉特性的图像

拼接方法显著减少了拼接图像的不连续边缘; Qiu等<sup>[15]</sup>通过新型能量函数的设计改善色差区域的拼接质量; 伏晓等<sup>[16]</sup>提出的亮度校正算法有效解决了曝光差异问题; Li等<sup>[17]</sup>基于四元数秩1对齐模型的嵌套迭代算法实现了局部最优接缝对齐。然而, 现有方法在低纹理场景下仍存在几何变形与视觉伪影的局限。对此, 本文提出基于 $\ell_1$ 范数与梯度约束的拼接方法, 通过新型能量函数的设计有效减少拼接图像中的错位与重影, 提升视觉真实感。

## 1 图像拼接方法的实现

本文提出的拼接方法的流程如图1所示, 主要包含图像配准和图像融合两个阶段。首先, 利用尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)算法<sup>[18]</sup>提取目标图像和参考图像的特征点, 并采用多尺度特征匹配策略<sup>[10]</sup>剔除误匹配点对; 然后, 联合点线特征估计单应性矩阵完成图像初步对齐; 最后, 通过构建能量函数搜索最优拼接缝, 结合泊松融合技术<sup>[19]</sup>生成视觉效果自然的全景图像。

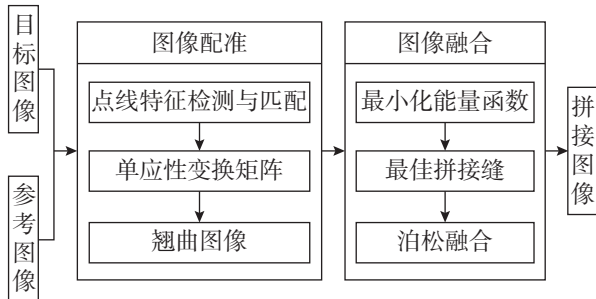


图1 无人机图像拼接方法流程示意图

Fig. 1 Process diagram for UAV image stitching method

### 1.1 对齐项

给定目标图像 $I_0$ 和参考图像 $I_1$ , 为实现两幅图像重叠区域的预对齐, 采用线性变换对 $I_0$ 和 $I_1$ 图像的像素进行匹配。设 $p_i = [x, y, 1]^T$ 和 $p'_i = [x', y', 1]^T$ 为一组匹配的特征点对, 其特征点之间的变换关系可通过单应性矩阵 $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示:

$$p'_i \sim H p_i \quad (1)$$

单应性矩阵 $H$ 的列向量由 $h_1 = [h_1 h_4 h_7]^T$ ,  $h_2 = [h_2 h_5 h_8]^T$ 和 $h_3 = [h_3 h_6 h_9]^T$ 组成, 因此式(1)可写成如下向量交叉积的形式:

$$\mathbf{0}_{3 \times 1} = p'_i \times H p_i \quad (2)$$

式(2)对应的坐标形式关系式为:

$$\mathbf{0}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 3} & -p_i^T & y' p_i^T \\ p_i^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} & -x' p_i^T \\ -y' p_i^T & x' p_i^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{h} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{h} = [h_1 h_2 h_3]^T$ 。由于矩阵中仅存在两行线性独立向量, 通过直接线性变换将式(3)表示为:

$$\mathbf{h} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{h}} \sum_{i=1}^M \|a_i \mathbf{h}\|^2 = \operatorname{argmin}_{\mathbf{h}} \|\mathbf{A} \mathbf{h}\|^2 \quad (4)$$

其中: 约束条件 $\|\mathbf{h}\|^2 = 1$ ;  $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$ ;  $a_i \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ 。解即为矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小奇异值对应的右奇异向量。

为提升局部对齐精度, 将目标图像划分为规则网格结构, 以此引导图像变形过程。假设网格顶点索引范围为 $1 \sim n$ , 采用 $2n$ 维向量 $\mathbf{V} = [x_1 y_1 x_2 y_2 \dots x_n y_n]^T$ 表征原始顶点坐标。对于目标图像中的任意采样点 $p$ , 有 $p = w \mathbf{V}$ , 其中 $w = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ ,  $p$ 通过双线性插值表示, 则变形顶点的坐标 $\mathbf{V}' = [x'_1 y'_1 x'_2 y'_2 \dots x'_n y'_n]^T$ , 且 $p' = w \mathbf{V}'$ 。因此点的变形问题可转化为网格变形问题。引入点对齐项, 其定义如下:

$$E_{\text{point}}(\mathbf{V}') = \sum_i \|w_i \mathbf{V}' - p'_i\|^2 \quad (5)$$

其中 $p'_i$ 表示参考图像中的匹配点。为进一步增强对齐效果, 将线对应关系纳入变形模型。设 $l_j$ 和 $l'_j$ 表示输入图像中的对应线,  $p_k$ 表示目标图像中所有切割段的端点, 其中 $p_k = w_{p_k} \mathbf{V}_{p_k}$ ,  $\mathbf{V}_{p_k}$ 表示网格的顶点向量。 $l'_j$ 由 $a_j x + b_j y + c_j$ 表示, 且 $\sqrt{a_j^2 + b_j^2} = 1$ , 则线对齐项 $E_{\text{line}}$ 定义为:

$$E_{\text{line}}(\mathbf{V}') = \sum_{j,k} \left\| \frac{l_j^T w_{p_k} \mathbf{V}'_{p_k}}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}} \right\|^2 \quad (6)$$

### 1.2 失真项

为缓解图像拼接过程中的几何失真问题, 采用准单应性变形方法<sup>[20]</sup>通过优化交叉线特征的斜率保持投影和透视关系。具体而言, 将 $E_{\text{crossline}}(\mathbf{V}')$ 分解为 $E_{\text{pers}}(\mathbf{V}')$ 和 $E_{\text{proj}}(\mathbf{V}')$ , 其中 $E_{\text{pers}}(\mathbf{V}')$ 用于保持由单应性变形先验给出的预期透视效果, 而 $E_{\text{proj}}(\mathbf{V}')$ 用于减少投影失真。设交叉线特征由 $\{(l'_u, l'_u)\}$ 和 $\{(l'_v, l'_v)\}$ 表示, 并采用 $p_k^u$ 和 $p_k^v$ 分别表示 $l_u$ 和 $l_v$ 上的点, 则 $E_{\text{pers}}(\mathbf{V}')$ 定义为:

$$E_{\text{pers}}(\mathbf{V}') = \sum_{i=1} \sum_{k=1} \left\| w_{p_{k+1}^u} \mathbf{V}'_{p_{k+1}^u} - w_{p_k^u} \mathbf{V}'_{p_k^u}, \vec{n}_i^u \right\|^2 + \sum_{j=1} \sum_{k=1} \left\| w_{p_{k+1}^v} \mathbf{V}'_{p_{k+1}^v} - w_{p_k^v} \mathbf{V}'_{p_k^v}, \vec{n}_j^v \right\|^2 + \sum_{j=1} \sum_{k=1} \left\| w_{p_k^v} \mathbf{V}'_{p_k^v} + w_{p_{k+2}^v} \mathbf{V}'_{p_{k+2}^v} - 2w_{p_{k+1}^v} \mathbf{V}'_{p_{k+1}^v} \right\|^2 \quad (7)$$

其中:  $\vec{n}_i^u$ 和 $\vec{n}_j^v$ 分别为变形后线 $l'_u$ 和 $l'_v$ 的法向量;  $E_{\text{pers}}(\mathbf{V}')$ 中前两项用于保持 $l'_u$ 和 $l'_v$ 的斜率; 最后一项用于保持 $l'_v$ 上点之间的长度比例。通过以下方式减轻投影失真:

$$E_{\text{proj}}(\mathbf{V}') = \sum_{i=1} \sum_{k=1} \left\| w_{p_{k+1}^i} \mathbf{V}'_{p_{k+1}^i} + w_{p_{k+2}^i} \mathbf{V}'_{p_{k+2}^i} - 2w_{p_{k+1}^i} \mathbf{V}'_{p_{k+1}^i} \right\|^2 \quad (8)$$

综上,  $E_{\text{pers}}$  和  $E_{\text{proj}}$  通过加权方式结合如下:

$$E_{\text{crossline}}(\mathbf{V}') = \lambda_{\text{pers}} E_{\text{pers}}(\mathbf{V}') + \lambda_{\text{proj}} E_{\text{proj}}(\mathbf{V}') \quad (9)$$

其中  $\lambda_{\text{pers}}$ ,  $\lambda_{\text{proj}}$  分别表示  $E_{\text{pers}}$  和  $E_{\text{proj}}$  的权重因子。

### 1.3 显著项

考虑到人眼视觉系统对线性结构具有高度敏感性, 优化非重叠区域中的线性特征保持是提升图像拼接质量的关键因素。设显著线为  $\{l_k\}_{k=1}$ , 每条显著线  $l_k$  由点集  $\{p_k^j\}_{j=1}$  表示, 则显著线的优化能量项定义如下:

$$E_{\text{sign}}(\mathbf{V}') = \sum_{k=1} \sum_{j=1} \left\| \left\langle w_{p_{j+1}^k} \mathbf{V}'_{p_{j+1}^k} - w_{p_j^k} \mathbf{V}'_{p_j^k}, \vec{n}_k \right\rangle \right\|^2 \quad (10)$$

其中  $\vec{n}_k$  为显著线  $l_k$  的法向量。式(10)通过优化特征线上关键点的斜率一致性, 确保变形后的线条结构保持笔直特性, 从而有效降低视觉失真感知。

### 1.4 目标能量项

上述能量项可整合为能量优化问题, 其目标函数可表示如下:

$$E_{\text{target}}(\mathbf{V}') = E_{\text{point}}(\mathbf{V}') + \alpha E_{\text{line}}(\mathbf{V}') + E_{\text{crossline}}(\mathbf{V}') + \beta E_{\text{sign}}(\mathbf{V}') \quad (11)$$

其中  $\alpha$ ,  $\beta$  分别表示能量项  $E_{\text{line}}$  和  $E_{\text{sign}}$  的权重因子。目标能量函数具有二次型特性, 故可采用稀疏线性求解器实现高效求解。

### 1.5 接缝切割能量函数

在传统接缝切割方法中, 设  $P$  为图像  $I_0$  和  $I_1$  对齐后的重叠区域, 定义标签集  $F = \{0, 1\}$  (0 和 1 分别对应图像  $I_0$  和图像  $I_1$ ), 则接缝切割即为像素  $m \in P$  分配标签  $f_m$  的过程。该策略的核心目标是通过最优标签分配  $f$  实现能量函数的最小化, 其数学表述如下:

$$E_{\text{seam}}(f) = \sum_{m \in P} D_m(m, f_m) + \sum_{(m,r) \in R} S_{m,r}(f_m, f_r) \quad (12)$$

其中  $R \subset P \times P$ , 表示像素邻域系统。

数据项  $D_m(m, f_m)$  用于评估单个像素  $m$  分配标签的代价, 平滑项  $S_{m,r}(f_m, f_r)$  则用于评估相邻像素对  $(m, r)$  分配不同标签  $(f_m, f_r)$  的惩罚代价。数据项定义为:

$$D_m(m, f_m) = \begin{cases} 0, & \text{如果 } m \in \text{重叠区域} \\ \gamma, & \text{否则} \end{cases} \quad (13)$$

其中  $\gamma$  表示较大的惩罚值。数据项对重叠区域像素进行等权重处理策略, 而对非重叠区域像素则施加一致性惩罚约束。

平滑项定义为:

$$S_{m,r}(f_m, f_r) = \frac{1}{2} |f_m - f_r| (I_d(m) + I_d(r)) \quad (14)$$

$$I_d(\cdot) = \|I_0(\cdot) - I_1(\cdot)\| \quad (15)$$

其中  $I_d(\cdot)$  表示基于欧几里得度量的色差。

不同能量函数会导致拼接缝位置差异显著, 进而影响最终图像拼接质量。结合实验观察发现, 基于  $\ell_1$  范数平方的接缝切割方法较其他范数约束方法具有更优的拼接性能。因此, 本文采用  $\ell_1$  范数的平方作为优化目标。在图像重叠区域中, 各像素的能量成本  $I_*(\cdot)$  由色差项  $I_{\text{color}}(\cdot)$  和梯度幅度项  $I_{\text{grad}}(\cdot)$  共同构成:

$$I_*(\cdot) = I_{\text{color}}(\cdot) + I_{\text{grad}}(\cdot) \quad (16)$$

色差项定义如下:

$$I_{\text{color}}(\cdot) = (\|I_0(\cdot) - I_1(\cdot)\|_1)^2 \quad (17)$$

为了进一步提升拼接路径的优化效果, 防止其穿越包含梯度特征的物体 (如建筑物、车辆等结构), 文中引入梯度约束项。梯度幅度项定义如下:

$$I_{\text{grad}}(\cdot) = \frac{1}{4} (|G_1^x(\cdot)| + |G_2^x(\cdot)| + |G_1^y(\cdot)| + |G_2^y(\cdot)|) + |G_1^x(\cdot) - G_2^x(\cdot)| + |G_1^y(\cdot) - G_2^y(\cdot)| \quad (18)$$

$$I_*(\cdot) = I_{\text{color}}(\cdot) + I_{\text{grad}}(\cdot)$$

因此, 平滑项可以重写为:

$$\tilde{S}_{m,r}(f_m, f_r) = \frac{1}{2} |f_m - f_r| (I_*(m) + I_*(r)) \quad (19)$$

最终, 接缝切割的能量函数  $E'_{\text{seam}}(f)$  可以写为:

$$E'_{\text{seam}}(f) = \sum_{m \in P} D_m(m, f_m) + \sum_{(m,r) \in R} \tilde{S}_{m,r}(f_m, f_r) \quad (20)$$

采用图切割算法<sup>[21]</sup>对构建的能量函数  $E'_{\text{seam}}(f)$  进行全局最小化求解, 以确定最优拼接路径。基于该优化结果, 进一步采用泊松融合技术<sup>[19]</sup>实现图像间的无缝过渡, 最终生成视觉效果自然的全景拼接图像。

## 2 实验与结果分析

为验证本文提出的无人机图像拼接方法的性能优势, 采用对比实验与消融实验相结合的方式, 通过定量指标与定性分析评估该方法在接缝线优化效果和视觉质量提升方面的综合表现。

### 2.1 数据集

采用 UAV-AIRPAI 数据集<sup>[22]</sup> 和 Pham 等<sup>[23]</sup> 建立的数据集进行实验验证, 其中 UAV-AIRPAI 数据集包含  $5\,478 \times 3\,648$  像素的航拍图像, 而 Pham 数据集包含  $4\,000 \times 3\,000$  像素的航拍图像, 两者均涵盖树木、建筑物和道路等多种典型土地覆盖类型, 为方法评估提供了多样化的场景支持。为确保实验结果的多样性和通用性, 采用随机选择策略从两组数据集中随机选择 30 对无人机图像进行测试, 全面验证本文方法在不同场景下的性能表现。

## 2.2 参数设置

实验采用 SIFT 算法<sup>[18]</sup> 提取和匹配点特征, 结合多尺度特征匹配算法<sup>[10]</sup> 去除离群值, 同时利用线段检测算法<sup>[24]</sup> 提取线特征以增强图像配准的准确性。在局部对齐阶段, 设置  $40 \times 40$  网格变形尺寸, 设定  $\alpha$ ,  $\lambda_{\text{pers}}$ ,  $\lambda_{\text{proj}}$  和  $\beta$  分别为 5, 50, 5, 5, 确保无人机图像在不同场景下均能获得最优拼接效果。

## 2.3 对比实验结果

选取单视角变形 (single-perspective warps,

SPW)<sup>[5]</sup>、线点一致性 (line-point consistence, LPC)<sup>[6]</sup> 和多尺度特征 (multiscale feature, MSF)<sup>[10]</sup> 3 种主流方法在无人机图像数据集上进行对比实验, 结果如图 2~4。由图 2 可看出: 对于 DJI\_0461 和 DJI\_0462 图像, SPW 方法在黄色椭圆标记区域存在明显伪影, LPC 和 MSF 方法中伪影问题有所缓解, 但在绿色椭圆标记区域存在严重失真。相比之下, 本文方法不仅能够有效消除伪影, 同时还抑制了图像失真。

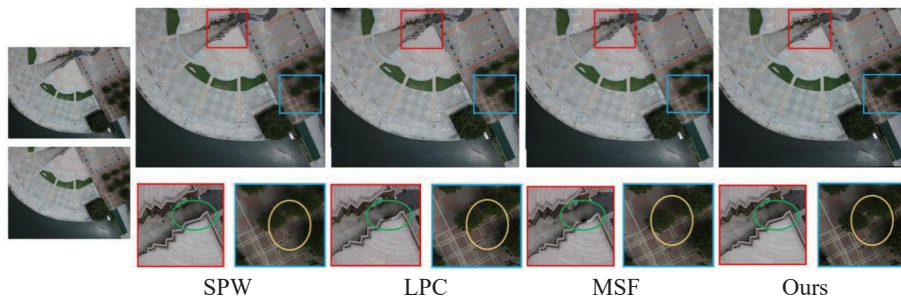


图2 DJI\_0461 和 DJI\_0462 图像对使用不同方法处理后的图像拼接结果

Fig. 2 Image stitching results of DJI\_0461 and DJI\_0462 using different methods

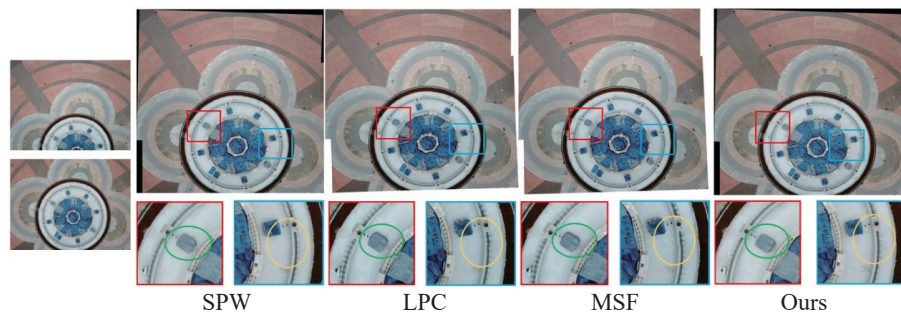


图3 DJI\_0890 和 DJI\_0891 图像对使用不同方法处理后的图像拼接结果

Fig. 3 Image stitching results of DJI\_0890 and DJI\_0891 using different methods

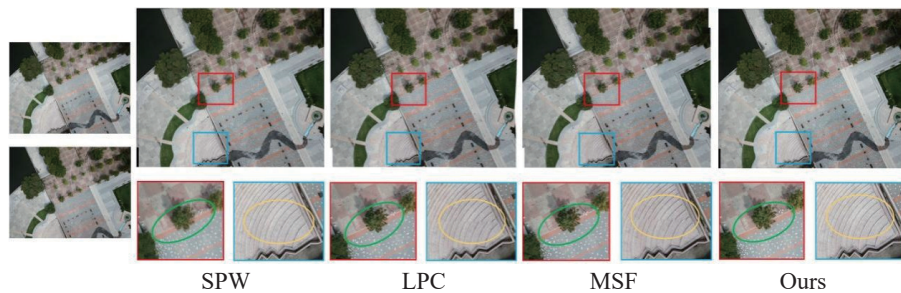


图4 DJI\_0470 和 DJI\_0471 图像对使用不同方法处理后的图像拼接结果

Fig. 4 Image stitching results of DJI\_0470 and DJI\_0471 using different methods

由图 3 可看出: 对于 DJI\_0890 和 DJI\_0891 图像, SPW 方法在绿色椭圆标记区域存在较为严重的伪影, LPC 和 MSF 方法在一定程度上减轻了伪影, 但在黄色椭圆标记区域引入几何错位。由此表明, 所提方法均有效避免了伪影和错位问题, 使图像更符合人的视觉效果。

由图 4 可看出: 对于 DJI\_0470 和 DJI\_0471 图像,

SPW 方法在绿色椭圆标记区域存在明显伪影, 而 LPC 和 MSF 方法能够抑制图像伪影, 但在黄色椭圆标记区域存在几何错位, 导致图像出现明显的失真。与其他 3 种方法相比, 本文方法有效缓解了上述问题, 在消除伪影的同时保持良好的几何一致性。

为评估不同方法拼接性能, 采用结构相似性 (structural similarity, SSIM) 和峰值信噪比<sup>[26]</sup> (peak

signal-to-noise ratio, PSNR) 指标, 在 30 对无人机图像数据集上进行实验, 通过重叠区域指标差异获得评估结果 (表 1, 2)。由表 1, 2 可看出: 本文方法平均 SSIM 值 0.883, 较 SPW, LPC 和 MSF 方法分别提

升 2.97%, 5.87% 和 3.07%; 平均 PSNR 值达 72.086 dB, 分别提升 0.595, 0.848, 0.841 dB。该定量结果验证了所提无方法的有效性。

表 1 不同方法在第一组测试图像中的结构相似性与峰值信噪比对比

Tab. 1 Comparison of SSIM and PSNR for different methods in the first set of test images

图像对	SPW		LPC		MSF		Ours	
	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB
DJI_0405&DJI_0406	0.879	72.420	0.881	72.647	0.862	71.644	<b>0.887</b>	<b>72.705</b>
DJI_0409&DJI_0410	<b>0.941</b>	<b>78.276</b>	0.915	77.837	0.916	77.115	0.911	77.326
DJI_0413&DJI_0414	0.711	69.059	0.704	69.007	0.695	68.686	<b>0.716</b>	<b>69.151</b>
DJI_0449&DJI_0450	0.899	71.295	<b>0.915</b>	<b>72.328</b>	0.884	71.033	0.903	71.404
DJI_0452&DJI_0453	0.851	71.060	0.837	71.111	<b>0.864</b>	<b>71.196</b>	0.861	71.129
DJI_0455&DJI_0456	0.870	72.674	0.769	71.394	0.811	71.565	<b>0.883</b>	<b>73.088</b>
DJI_0458&DJI_0459	0.809	70.828	0.761	70.237	0.831	70.979	<b>0.867</b>	<b>71.881</b>
DJI_0461&DJI_0462	0.881	72.366	0.871	72.088	0.870	71.868	<b>0.910</b>	<b>73.761</b>
DJI_0464&DJI_0465	0.858	72.101	0.814	71.196	0.852	71.583	<b>0.876</b>	<b>72.442</b>
DJI_0467&DJI_0468	0.840	<b>69.503</b>	0.770	68.800	<b>0.848</b>	69.383	0.799	69.075
DJI_0470&DJI_0471	0.813	69.765	0.802	70.111	0.831	70.006	<b>0.877</b>	<b>71.203</b>
DJI_0473&DJI_0474	0.845	71.036	0.784	70.531	0.815	70.330	<b>0.866</b>	<b>71.876</b>
DJI_0884&DJI_0885	0.929	74.593	<b>0.941</b>	<b>75.298</b>	0.910	73.413	0.928	74.581
DJI_0887&DJI_0888	0.917	72.813	0.928	73.773	0.888	71.730	<b>0.950</b>	<b>74.194</b>
DJI_0890&DJI_0891	0.864	70.620	0.848	70.382	0.822	69.849	<b>0.904</b>	<b>71.345</b>
DJI_0892&DJI_0893	0.908	71.162	0.894	70.822	<b>0.930</b>	71.251	0.928	<b>71.289</b>
DJI_0895&DJI_0896	0.919	72.699	0.901	71.824	0.863	70.764	<b>0.923</b>	<b>73.003</b>
DJI_0900&DJI_0901	0.833	70.787	0.829	70.836	0.817	70.333	<b>0.849</b>	<b>71.118</b>
DJI_0903&DJI_0904	0.848	72.218	0.838	71.804	0.799	70.902	<b>0.852</b>	<b>72.774</b>
DJI_0906&DJI_0907	0.909	73.413	0.894	73.120	0.911	73.399	<b>0.947</b>	<b>74.515</b>

表 2 不同方法在第二组测试图像中的结构相似性与峰值信噪比对比

Tab. 2 Comparison of SSIM and PSNR for different methods in the second set of test images

图像对	SPW		LPC		MSF		Ours	
	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB
DJI_0008&DJI_0009	0.739	67.464	0.729	67.461	0.815	68.794	<b>0.833</b>	<b>69.719</b>
DJI_0048&DJI_0049	0.873	69.149	0.791	68.252	0.892	<b>71.115</b>	<b>0.899</b>	69.705
DJI_0061&DJI_0062	0.811	71.495	0.826	72.163	0.772	71.067	<b>0.860</b>	<b>72.180</b>
DJI_0154&DJI_0155	0.762	69.341	0.725	68.569	0.816	69.533	<b>0.892</b>	<b>71.841</b>
DJI_0200&DJI_0201	0.703	67.724	0.709	67.572	<b>0.828</b>	<b>69.259</b>	0.782	68.124
DJI_0443&DJI_0444	0.902	69.334	0.866	68.899	0.927	70.089	<b>0.954</b>	<b>70.459</b>
DJI_0462&DJI_0463	0.865	70.864	0.838	70.235	0.848	70.547	<b>0.870</b>	<b>70.927</b>
DJI_0871&DJI_0872	0.920	73.768	0.849	72.526	0.924	73.206	<b>0.939</b>	<b>74.233</b>
DJI_0897&DJI_0898	0.905	71.954	0.879	71.613	0.927	72.160	<b>0.941</b>	<b>73.215</b>
DJI_0905&DJI_0906	0.928	<b>74.961</b>	0.918	74.689	<b>0.938</b>	74.542	0.889	74.319

对于图像的拼接缝  $Q$ , 采用接缝质量指标评估其缝合效果。该指标通过计算接缝上所有像素 SSIM

的算术平均值量化评估拼接缝质量, 其数值越小表明拼接缝质量越优, 最终拼接结果也越接近真实场

景。具体计算公式如下:

$$e(Q) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1 - \text{SSIM}(P_0(m_t), P_1(m_t))}{2} \quad (21)$$

其中:  $m_t$  为接缝上的第  $t$  个像素;  $N$  为接缝上的像素总数。选取 LPC 和 MSF 典型方法进行对比实验,

结果如图 5。从图 5 可看出: 在 30 对无人机图像中, 本文方法有 22 对获得了更小的接缝误差值, 表明所提方法在接缝优化质量方面具有显著优势, 能够产生更为自然的图像拼接效果。

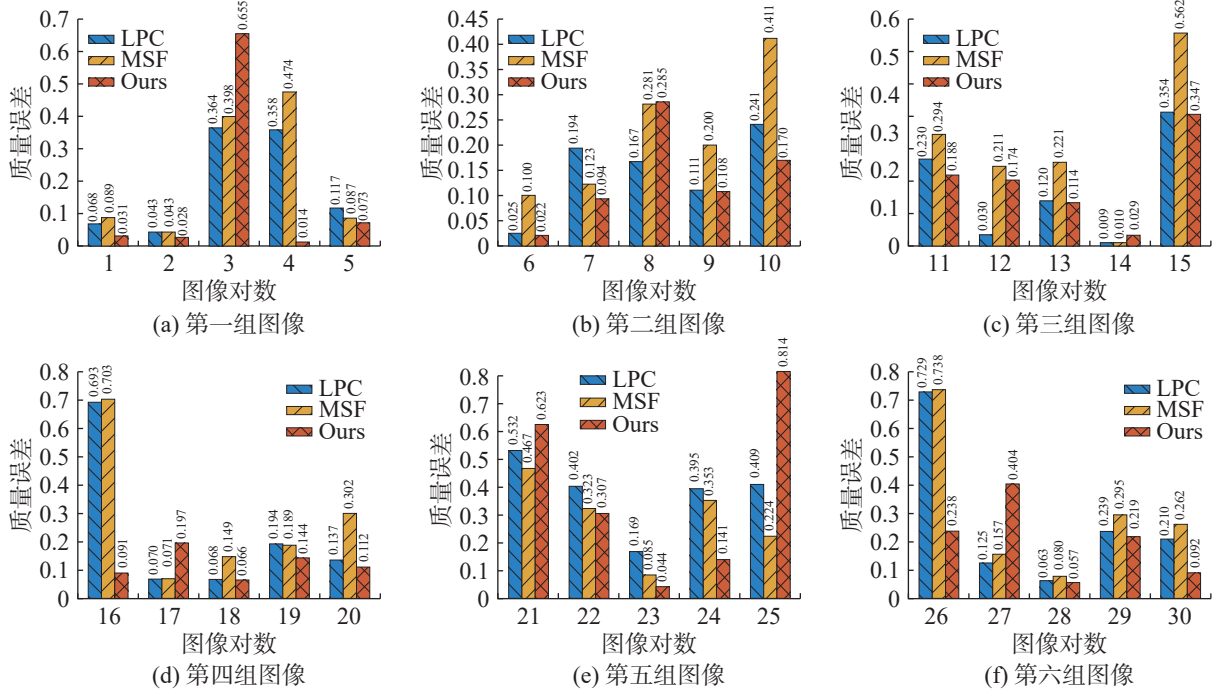


图5 不同测试数据集下各方法的定量性能对比

Fig. 5 Quantitative performance comparison of various methods across different test datasets

2.4 消融实验

为进一步验证所提方法的有效性, 针对能量函数中的平滑项进行消融实验, 评估不同平滑项配置对拼接性能的影响。实验保持特征匹配和对齐策略不变, 仅调整能量函数中的平滑项设置。不同平滑项配置下(如表 3)图像的拼接效果如图 6 所示: 图像(c)~(f)中红色矩形框标识区域存在不同程度的失真, 蓝色矩形框区域存在错位。相比之下, 本文提出的平滑项配置能有效缓解失真和错位问题, 展现出显著的性能优势。

表 3 不同平滑项配置下的 SSIM 和 PSNR 性能

Tab.3 Performance of SSIM and PSNR for different smoothing term configurations

平滑项配置	SSIM	PSNR/dB
(a) 输入图像(无处理)	—	—
(b) 所提平滑项 ( $l_1$ 范数平方+梯度项)	<b>0.877</b>	<b>71.203</b>
(c) 无梯度项( $l_2$ 范数)	0.809	69.657
(d) $l_2$ 范数+梯度项	0.841	70.108
(e) $l_1$ 范数的 5/2 次幂+梯度项	0.810	69.663
(f) $l_1$ 范数的 3/2 次幂+梯度项	0.840	70.086

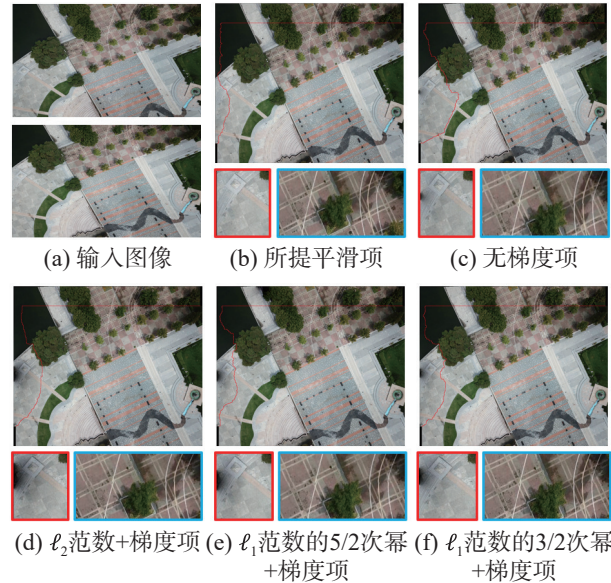


图6 平滑能量项的消融分析

Fig. 6 Ablation analysis of the smoothness energy term

由表 3 可看出: 本文的平滑项配置在 SSIM 和 PSNR 指标上均优于对比方法, 与方法 (c)~(f) 相比, 其 SSIM 值分别提升 8.41%, 4.28%, 8.27%, 4.40%; PSNR 值分别提升 1.546, 1.095, 1.540, 1.117 dB。

综合实验结果表明,相较于传统基于色差与梯度差的成本函数,本文方法不仅在定量评价指标上展现出显著优势,在视觉感知层面也有效提升了拼接图像的自然度与整体质量表现。

### 3 结论

针对低纹理无人机图像拼接中的错位和重影问题,提出一种基于 $l_1$ 范数与梯度约束的拼接方法。首先,通过提取待拼接图像的点线特征并采用多尺度特征匹配策略,显著提升图像配准精度,同时有效剔除误匹配点;再次,构建一种新型的能量函数,在平滑项中采用 $l_1$ 范数平方度量色差并融合梯度差约束,实现最优缝合线搜索;最后,基于图切割算法和泊松融合技术生成自然全景图像。将所提方法与SPW, LPC和MSF 3种典型拼接方法进行对比实验,结果表明:与3种典型方法相比,本文方法拼接图像的SSIM值分别提升2.97%, 5.87%, 3.07%; PSNR值分别提高0.595, 0.848, 0.841dB。此外,针对能量函数的平滑项配置,本文方法平滑项配置( $l_1$ 范数平方+梯度项)的SSIM(0.877)和PSNR值(71.203 dB)总体最高,与无梯度项( $l_2$ 范数)、 $l_2$ 范数+梯度项、 $l_1$ 范数的 $5/2$ 次幂+梯度项和 $l_1$ 范数的 $3/2$ 次幂+梯度项相比,其SSIM值分别提升8.41%, 4.28%, 8.27%, 4.40%;其PSNR值分别提高1.546, 1.095, 1.540, 1.117 dB。所提方法显著缓解了无人机图像拼接过程中的错位和重影问题,在主观视觉评价和客观指标上均展现出优越性能。

#### 参考文献:

- [1] 陈丹, 汤程, 谢宇, 等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划 [J/OL]. 航空学报, (2025-04-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.  
CHEN D, TANG C, XIE Y, et al. Real time dual layer path planning of unmanned aerial vehicles for urban low altitude logistics distribution[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, (2025-04-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.
- [2] 李刚勇, 陈春波, 李均力, 等. 低空无人机遥感在草原监测评价中的应用进展 [J]. 生态学报, 2023, 43(16):6889-6901.  
LI G Y, CHEN C B, LI J L, et al. Advances in applying low-altitude unmanned aerial vehicle remote sensing in grassland ecological monitoring[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16):6889-6901.
- [3] 秦勇, 邵长虹, 杨怀志, 等. 京沪高铁基础设施无人机智能巡检系统关键技术 [J]. 中国铁路, 2024(4):15-21.  
QIN Y, SHAO C H, YANG H Z, et al. Key technologies of UAV intelligent patrol inspection system for Beijing-Shanghai HSR infrastructure[J]. China Railway, 2024(4): 15-21.
- [4] GAO J H, KIM S J, BROWN M S. Constructing image panoramas using dual-homography warping[C]//CVPR 2011. Colorado Springs, CO, USA:IEEE, 2011:49-56.
- [5] LIAO T L, LI N. Single-perspective warps in natural image stitching[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29:724-735.
- [6] JIA Q, LI Z J, FAN X, et al. Leveraging line-point consistence to preserve structures for wide parallax image stitching[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Nashville, TN, USA: IEEE, 2021:12181-12190.
- [7] 孙商文, 刘宇, 徐昭洪, 等. 基于特征优化与最优拼接缝的视差图像拼接 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 207-212.  
SUN S W, LIU Y, XU Z H, et al. Parallax image stitching based on feature optimization and optimal stitching seam[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(6): 207-212.
- [8] NIE L, LIN C Y, LIAO K, et al. Parallax-tolerant unsupervised deep image stitching[C]//2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris, France: IEEE, 2023:7365-7374.
- [9] 陈珺, 高海宽, 李梓贤. 基于半投影翘曲的无人机图像拼接方法 [J]. 计算机应用研究, 2024, 41(1):301-305.  
CHEN J, GAO H K, LI Z X. UAV image stitching method based on half-projection warping[J]. Application Research of Computers, 2024, 41(1):301-305.
- [10] LI R, XUE W. Robust UAV image stitching via multiscale feature matching and local homography matrix estimation[C]//2024 International Conference Automatics and Informatics. Varna, Bulgaria:IEEE, 2024:358-363.
- [11] LIN K M, JIANG N J, CHEONG L F, et al. SEAGULL: seam-guided local alignment for parallax-tolerant image stitching[C]//Computer Vision - ECCV 2016. Cham: Springer, 2016:370-385.
- [12] LI N, LIAO T L, WANG C. Perception-based seam cutting for image stitching[J]. Signal, Image and Video Processing, 2018, 12(5):967-974.
- [13] LIAO T L, CHEN J, XU Y F. Quality evaluation-based iterative seam estimation for image stitching[J]. Signal, Image and Video Processing, 2019, 13(6):1199-1206.
- [14] CAO Q J, SHI Z F, WANG P M, et al. A seamless image-stitching method based on human visual discrimination and attention[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4):1462.
- [15] QIU X Y, LI Q L. Artefact-free image stitching via a better normed seam-cutting energy function[J]. IET Image

- Processing, 2021, 15(6):1371–1381.
- [16] 伏晓, 卿粼波, 何小海. 基于亮度校正的航拍图像拼接融合算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(2):179–184, 194.
- FU X, QING L B, HE X H. Stitching fusion algorithm of aerial image based on brightness correction[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2019, 36(2):179–184, 194.
- [17] LI J X, ZHOU Y C. Automatic color image stitching using quaternion rank-1 alignment[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2022:19688–19697.
- [18] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91–110.
- [19] PÉREZ P, GANGNET M, BLAKE A. Poisson image editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3):313–318.
- [20] LI N, XU Y F, WANG C. Quasi-homography warps in image stitching[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(6):1365–1375.
- [21] BOYKOV Y, KOLMOGOROV V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision[C]//Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001:359–374.
- [22] REN M X, LI J N, SONG L Q, et al. MLP-based efficient stitching method for UAV images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19:2503305.
- [23] PHAM N T, PARK S, PARK C S. Fast and efficient method for large-scale aerial image stitching[J]. IEEE Access, 2021, 9:127852–127865.
- [24] GROMPONE VON GIOI R, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4):722–732.
- [25] BAKUROV I, BUZZELLI M, SCHETTINI R, et al. Structural similarity index (SSIM) revisited: a data-driven approach[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 189:116087.
- [26] MOZHAIEVA A, STREETER L, VLASUYK I, et al. Full reference video quality assessment metric on base human visual system consistent with PSNR[C]//2021 28th Conference of Open Innovations Association. Moscow, Russia: IEEE, 2021:309–315.

责任编辑:何莉

### (上接第 382 页)

- [17] MALLAREDDY M, PRASAD CHINTA D, RAJPATHAK B, et al. Application of biogeography based Fractional order PID controller in DC motor drive speed control[C]//2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies. Bangalore, India: IEEE, 2020:1–6.
- [18] SHAH P, AGASHE S. Review of fractional PID controller[J]. Mechatronics, 2016, 38:29–41.
- [19] 吴明江, 王业琴, 王超, 等. 基于多目标分数阶 PID 的水风抽蓄并网优化控制[J]. 人民长江, (2025–03–06). <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250305.1428.006>.
- WU M J, WANG Y Q, WANG C, et al. Research on optimized control of water-wind pumped storage integration into power network based on multi-objective fractional order PID[J/OL]. Yangtze River, (2025–03–06). <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250305.1428.006>.
- [20] 李佳成, 陈鹏云, 常哲. 基于分数阶 S 面模型的四旋翼轨迹跟踪控制[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(3): 286–292.
- LI J C, CHEN P Y, CHANG Z. Trajectory tracking control of quadrotor based on fractional order S-plane model[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(3): 286–292.
- [21] 姚钢, 李华荣, 周荔丹, 等. MP–MMC 驱动六相永磁同步风力发电机分数阶 PID 控制研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12):93–107.
- YAO G, LI H R, ZHOU L D, et al. Research on fractional order PID control of six phase permanent magnet wind turbine driven by MP–MMC[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12):93–107.
- [22] 陈克难. 基于自抗扰控制技术的 LLC 谐振变换器研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2021.
- CHEN K N. Research on LLC Resonant Converter Based on Active Disturbance Rejection Control Technique[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2021.
- [23] SABATIER J, MOZE M, FARGES C. LMI stability conditions for fractional order systems[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 59(5):1594–1609.
- [24] 徐之淦. 基于干扰观测器的四旋翼无人机分数阶控制器设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- XU Z S. Fractional-order Controller Design for Quadrotor UAV Based on Disturbance Observer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [25] 杨平, 邓亮, 徐春梅, 等. PID 控制器参数整定方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- YANG P, DENG L, XU C M, et al. PID Controller Parameter Tuning Methods and Applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.

责任编辑:何莉