

融合卫星遥感图像与航拍实时影像的拒止定位系统

张新生

中国人民解放军93160部队, 北京

收稿日期: 2026年1月23日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月28日

摘要

在卫星应用中, 电磁干扰、卫星盲区、轨道受限等卫星拒止情况, 可能会导致卫星依赖型定位方案失效, 对生产、生活, 甚至国防安全产生重大影响。面对卫星拒止定位的挑战, 可结合无人机等航拍影像灵活机动的优势, 为卫星遥感定位提供有效补充。融合卫星遥感图像与航拍实时影像构建拒止定位系统, 核心关键在于实现两类影像的精准关联匹配, 然而无人机航拍受飞行姿态波动、复杂地形影响, 影像易存在大角度旋转、尺度偏移等几何变换, 直接影响定位精度与可靠性。针对这一问题, 本文设计了一种融合卫星遥感图像和航拍实时影像的拒止定位系统, 并在该系统中嵌入了本文新提出的高精度图像匹配智能算法, 该算法基于主导方向的图像匹配, 保障了卫星拒止场景下两类影像的精准关联。实验结果表明, 所构建的拒止定位系统在城镇、森林、沙漠、海洋四类典型地形场景中, 针对航拍影像与卫星遥感影像的定位精度表现优异。该系统有效破解了卫星拒止条件下的定位难题, 同时结合最先进的深度学习图像匹配算法, 充分发挥卫星遥感图像的基准支撑作用与航拍影像的实时补充优势, 为应急测绘、地理国情动态监测等卫星依赖度高的场景提供了高可靠、高效率的定位解决方案。

关键词

卫星应用, 拒止定位, 深度学习, 图像匹配, 影像融合

A Denial-of-Service Resistant Positioning System Integrating Satellite Remote Sensing Imagery and Real-Time Aerial Images

Xinsheng Zhang

Unit 93160 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing

Received: January 23, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 28, 2026

文章引用: 张新生. 融合卫星遥感图像与航拍实时影像的拒止定位系统[J]. 软件工程与应用, 2026, 15(2): 317-325.
DOI: 10.12677/sea.2026.152030

Abstract

In satellite applications, satellite denial scenarios such as electromagnetic interference, satellite blind zones, and orbital constraints can lead to the failure of satellite-dependent positioning schemes, exerting a significant impact on production, daily life, and even national defense security. To address the challenges of positioning under satellite denial conditions, the flexible and maneuverable advantages of aerial imagery from unmanned aerial vehicles (UAVs) and other platforms can be leveraged to provide an effective supplement to satellite remote sensing positioning. The core of constructing a denial-resistant positioning system by integrating satellite remote sensing imagery and real-time aerial imagery lies in achieving precise correlation and matching between the two types of imagery. However, UAV aerial photography is susceptible to flight attitude fluctuations and complex terrain, which often result in significant geometric transformations such as large-angle rotation and scale offset in the imagery, directly affecting positioning accuracy and reliability. To tackle this issue, this paper designs a denial-resistant positioning system that integrates satellite remote sensing imagery and real-time aerial imagery, and embeds a newly proposed high-precision intelligent image matching algorithm within the system. This algorithm, based on dominant direction-based image matching, ensures the precise correlation of the two types of imagery in satellite denial scenarios. Experimental results demonstrate that the constructed denial-resistant positioning system exhibits excellent positioning accuracy for aerial imagery and satellite remote sensing imagery across four typical terrain scenarios: urban, forest, desert, and marine. The system effectively solves the positioning problem under satellite denial conditions. Furthermore, by incorporating state-of-the-art deep learning-based image matching algorithms, it fully exploits the benchmark support role of satellite remote sensing imagery and the real-time supplementary advantages of aerial imagery, providing a highly reliable and efficient positioning solution for scenarios with high satellite dependency, such as emergency mapping and dynamic monitoring of geographical conditions.

Keywords

Satellite Applications, Denial-Resistant Positioning, Deep Learning, Image Matching, Image Fusion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

随着卫星融合应用的不断深化, 航拍实时影像与卫星遥感图像的融合技术在导航定位[1]-[3]、地图构建等诸多依赖卫星支撑的实际场景中得到广泛应用[4][6]。其中, 两类影像的精准匹配作为核心支撑环节, 其匹配精度与鲁棒性直接决定了下游卫星融合应用任务的最终性能。航拍场景具有独特性, 受飞行姿态变化、拍摄视角差异等因素影响, 航拍图像常面临大角度旋转、尺度变化等复杂几何变换挑战[7], 这一特性给卫星遥感图像与航拍影像的融合匹配带来了极大挑战, 常规图像匹配算法的性能极易出现显著退化[8][9], 难以满足卫星依赖型应用对匹配可靠性的需求。

融合卫星遥感图像与航拍实时影像的拒止定位流程如图 1 所示, 在飞行的过程中, 对下方进行实时拍摄, 航拍图像通过与该区域的基准地图块进行匹配可以得到多对匹配点。根据得到的匹配点对, 确定无人机当前的飞行位置, 实现视觉导航。因此, 图像匹配技术的速度与定位准确度, 直接影响无人机的导航精度。

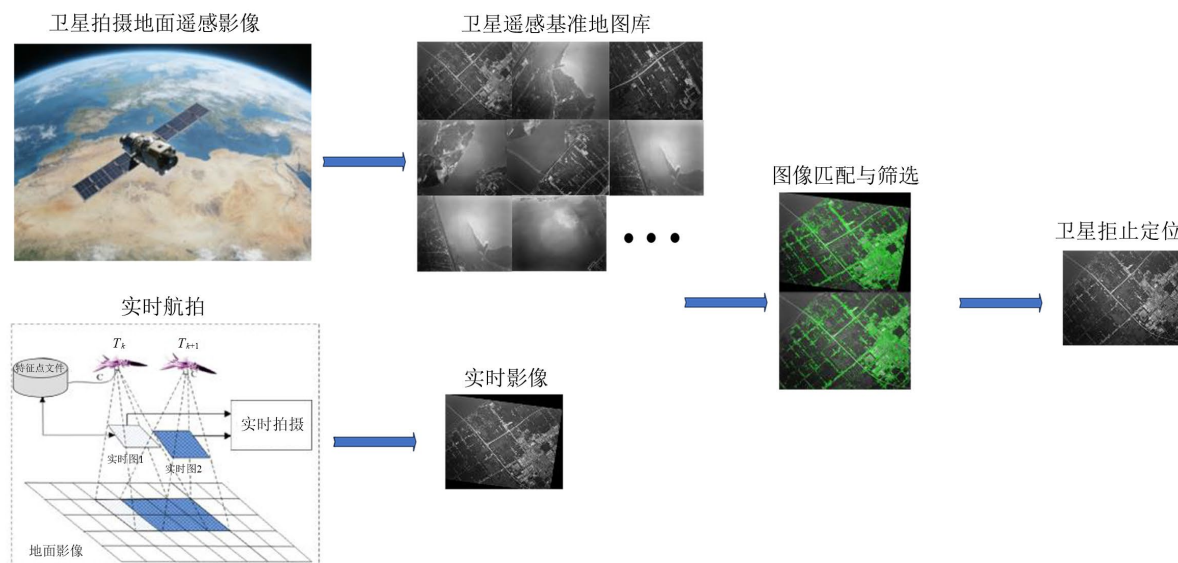


Figure 1. Flowchart of denied region localization for aerial real-time video

图 1. 实时影像的拒止定位流程图

然而，在实际应用过程中，卫星遥感基准地图与无人机实时航拍图差距较大，图像的差距一方面由于无人机拍摄的俯仰角和飞行高度决定，另一方面由于卫星遥感基准地图并非实时更新，存在建筑物的显著变化[10]。这对于无人机航拍图与基准地图的精准匹配，带来了巨大的挑战。

为提升拒止定位的准确性，开展了大量应用研究。随着计算机视觉的发展，深度学习驱动的匹配模型凭借强大的特征学习与关联建模能力，逐渐成为主流。多种基于卷积神经网络的特征点提取与描述算法比传统算法拥有更强的特征检测能力和描述能力使得图像匹配能力大幅提升[8] [11] [12]。

然而，通过深入研究发现[13] [14]，当前主流深度学习匹配模型在特征表示环节缺乏显式的旋转不变性设计，导致其在无人机航拍常见的大角度旋转场景中，定位精度大幅下降，严重限制了其在复杂航拍场景中的应用范围[15]。如何增强拒止定位系统的鲁棒性和准确性，使其能够适应无人机航拍的复杂几何变换场景，成为当前亟待解决的关键问题。

针对上述局限，本文提出一种具有鲁棒性和高精度的融合卫星遥感图像与航拍实时影像的拒止定位系统。该系统在对卫星遥感图像和实时遥感影像进行匹配时，依托初始特征匹配对构建可表征旋转特性的主导方向，并在匹配推理环节嵌入旋转一致性约束，对算法的匹配过程进行优化，以提升模型对大角度旋转场景的适应能力。本文通过在自建无人机航拍数据集的大量实验验证了所提应用系统的有效性。本研究不仅有效强化了现有匹配模型的旋转适应能力，也为无人机航拍图像在复杂几何变换场景下的可靠应用提供了技术支撑，具有重要的理论意义与实用价值。

2. 系统设计

2.1. 设计目标

本系统围绕“利用卫星遥感图像进行高精度拒止定位”的核心需求开展设计，结合功能实用性、操作易用性、视觉专业性和场景适配性，最终实现拒止条件下精准、高效、直观的图像匹配定位。系统的核心功能目标是满足拒止定位的全流程业务需求，从图像输入到结果输出的端到端流程，支持卫星遥感图像、无人机航拍图像的上传与预览。图像匹配的核心是对参考图像与待匹配图像进行相似性评估[15]-[17]。由于参考图像与待匹配图像的拍摄时间存在差异，这类图像间常存在光照强度波动、拍摄视角偏移

等不一致性[18][19]。

2.2. 系统组成

系统整体由数据预处理子系统、图像匹配子系统(核心)、交互展示子系统协同组成,其中图像匹配子系统是实现拒止定位功能的核心枢纽,具体架构如图2所示。

首先,数据预处理子系统:系统的前置数据准备环节。它是整个系统的数据清洗与标准化入口,负责对输入的卫星遥感图像、实时影像(如无人机航拍图)进行预处理,为核心的图像匹配提供合格、统一的数据源。

其次,图像匹配子系统是的核心功能执行层,它是整个拒止定位系统的核心环节,通过特征匹配逻辑完成从图像关联到定位实现的关键转化,是实现拒止条件下定位的关键。因此,本文提出一种高精度的图像匹配算法,并嵌入子系统中。该算法(Dominant Direction Correction, DDC)既可以提升旋转不变性,又无需重新进行模型训练。其流程如图3所示,为后续拒止条件下的定位环节奠定可靠基础。

最后,交互展示子系统是用户与系统交互的操作与结果出口,负责接收用户操作、展示系统处理结果,实现人机协同。

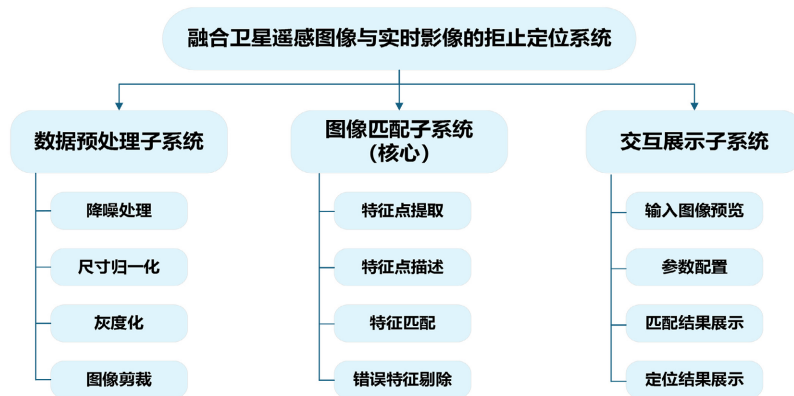


Figure 2. System architecture diagram of denied region localization
图2. 拒止定位系统组成图

2.3. 核心算法

本系统采用的图像匹配基于主导方向进行改进,因此主导方向的确定至关重要。设 $P = \{p_i\}$ 表示基准卫星地图的匹配特征点集合, $Q = \{q_i\}$ 表示无人机航拍图的匹配特征点集合, i 表示初级匹配的特征对序号,得到多条匹配点之间的连线,进而计算出每对连线与水平方向的夹角:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y_p(i) - y_q(i)}{x_p(i) - x_q(i)}\right) \quad (1)$$

以一对图像为例,特征点对连线的角度分布图如图3所示,使用统计法选取旋转角占比最高作为主导方向。

值得注意的是,错误的主导方向会使航拍图校正后仍存在较大的旋转差异,从而导致后续匹配完全失效。因此,本文采用错误匹配点筛选和方向校正的方式,从提高特征点质量和校正错误主导方向这两个角度,避免主导方向错判导致的匹配失效。

一方面,算法从根源上来减少主导方向错判,由于初始匹配对中的错误匹配(如重复纹理、背景噪声

导致)会使方向角分布杂乱, 直接导致主导方向估计错误, 因此, 在计算方向直方图前, 通过 RANSAC 进行特征点对筛选。特征点对的筛选能够有效降低主导方向的误判率。

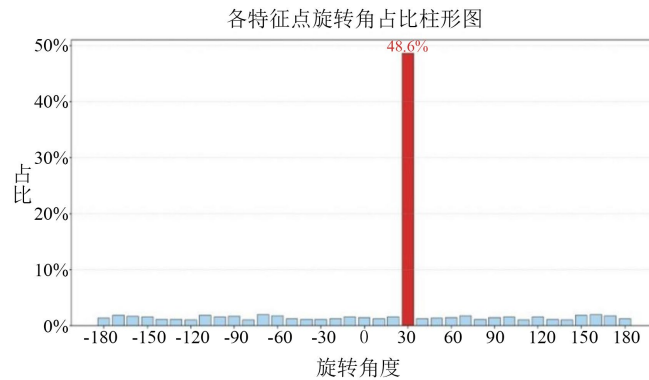


Figure 3. Histogram of angular distribution of matched point pairs
图 3. 匹配点对的角度分布柱形图

另一方面, 在完成初次匹配后, 提出一种角度自适应微调模块, 二次匹配特征点数越多, 说明当前旋转角度越接近真实方向, 微调幅度越小; 反之则增大微调幅度, 直至特征点数达到峰值。以初始主导角度 θ_0 为起点, 每次迭代的匹配点变化数 $\Delta N(\theta_k)$ 和旋转一致性得分 $S(\theta_k)$ 调整角度, 迭代方法如公式(2)所示:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta \cdot s[\Delta N(\theta_k)] \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta$ 为每次迭代的角速度微调参数, 经实验测试设为 0.5° 。 $s[\cdot]$ 为符号函数, 若 $\Delta N(\theta_k) > 0$, 则增大主导方向角度; 反之, 减小主导方向角度。

通过上述步骤, 实现了主导方向的确认和校正, 防止错误的主导方向估计导致后续匹配完全失效。其算法流程如图 4 所示。

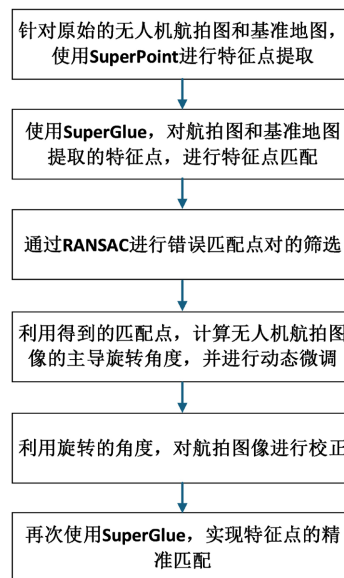


Figure 4. Proposed algorithm flowchart
图 4. 算法流程图

2.4. 交互展示子系统

交互展示子系统是用户与整个拒止定位系统交互的核心接口，承担着操作承接与结果呈现的双重作用，其界面如图 5 所示。其中，输入图像预览功能会展示上传的卫星遥感图像与实时影像，便于用户提前确认数据源的准确性；参数配置功能支持用户自主设置匹配算法参数，满足不同场景下的个性化需求；匹配结果展示会清晰呈现核心指标，让用户直观了解匹配过程的关键数据；而定位结果展示则会输出拒止条件下的位置信息，帮助用户快速掌握最终的定位结果。



Figure 5. Interactive display interface diagram
图 5. 交互展示界面图

3. 应用与效能分析

3.1. 数据库构建

为全面验证所提基于主导方向校正的图像匹配算法的有效性 with 泛化能力，本研究构建了包含两类核心数据的实验数据库，分别是通过谷歌地图提取的卫星遥感图像数据库和自制的无人机航拍数据库。其中，卫星遥感图像数据库涵盖城市道路、沙漠地貌、海洋、港口等 4 种典型场景。无人机航拍数据库通过无人机实地航拍采集获得。图 6 为四种情况下的卫星遥感影像地图和待匹配的实时拍摄图像。接下来分别对这四种情况下的场景，使用主流的图像匹配方法以及本文提出的图像匹配算法 DCD 进行配准测试。

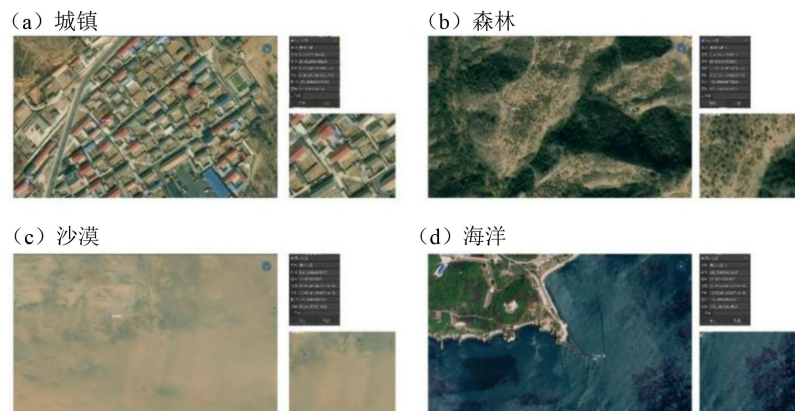


Figure 6. Reference and local maps under different terrain conditions
图 6. 不同地形下的基准地图和待配准的局部图像

3.2. 效能评估

(1) 定量分析

对上面的四种情况下(城市、森林、沙漠、海洋)的局部场景进行角度旋转,然后再进行配准测试。使用最新的主流配准方法作为对比。其结果如表 1 所示。可以看到,本文的定位系统在所有地形场景中均取得了最高的定位精度,且存在显著性能优势。

在城镇地形中,本文系统(99.24%)相较主流方法,分别提升 5.98%和 2.72%。在森林地形中,DDC 方法进一步提升至 98.86%,分别提升 25.45%和 2.94%。沙漠地形中,DDC 方法以 98.41%的精度领先,分别提升 35.04%和 2.76%。海洋地形中,IDDC 方法以 98.74%的精度最优,相比分别提升 22.15%和 2.02%。

Table 1. Localization accuracy under different terrain conditions (%)

表 1. 不同地形下的定位精度(%)

	城镇	森林	沙漠	海洋
SuperGlue	93.26	73.41	63.37	76.59
EfficientLoftr	96.52	95.92	95.65	96.72
本文的定位系统	99.24	98.86	98.41	98.74

(2) 应用案例

为了验证系统的实际效能,本系统针对北京的百里山水画廊区域,开展了实际应用。首先,收集了该区域的 19 级遥感地图,如图 7 所示。



Figure 7. Level-19 remote sensing map of baili landscape gallery

图 7. 百里山水画廊 19 级遥感地图

在收集了该区域的卫星遥感地图后,使用大疆无人机进行该区域的飞行与航拍,并将航拍结果实时回传给基于 RK3588 的智能终端上。该智能终端可以部署本文的卫星拒止定位系统,并能够对实时视频流进行截取,并进行定位。虽然在实际应用中,卫星遥感地图和无人机航拍图像差异很大,但是本系统从多个基准地图成功找到了无人机所在区域的遥感地图块,并得到了多对特征点匹配对,其可视化结果如图 8 所示。其中,左图为遥感卫星地图,右图为无人机实时航拍图像(展示其灰度图像),红线表示通过错误匹配点筛选的连线,绿线表示未经过匹配的特征点对。可以看到,本系统的成功实现了百里山水画廊的实时精准定位,到达了像素级的精准定位,经计算,定位精度为 5 m 以内,定位的处理时间为 0.6 s 左右,满足了卫星实际应用中的时效性需求。

(a) 卫星遥感地图 (b) 无人机航拍影像

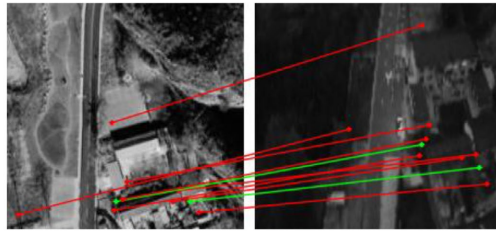


Figure 8. Localization results
图 8. 定位效果结果展示

4. 结论

本文针对电磁干扰、卫星盲区、轨道受限等卫星拒止情况，融合利用卫星遥感图像和实时航拍图像，基于深度学习算法，设计了高精度的拒止定位系统。该系统嵌入了本文提出的 DCD 图像匹配算法，定量与实际应用结果表明，在大角度航拍旋转与复杂地形等情况下，本文的定位系统能保持高精度，且显著优于主流方法。

后续研究可进一步优化拒止定位系统性能，以适配边缘设备的实时部署需求；同时可扩展至强光照、强遮挡等极端环境场景，进一步提升算法的泛化能力。

参考文献

- [1] 公海, 陈梓溯, 刘欣, 等. 封闭或半封闭场景中伪卫星定位技术的应用与发展趋势[J]. 卫星应用, 2025(7): 12-17.
- [2] 曲向芳. 空间技术赋能多行业领域发展[J]. 卫星应用, 2025(7): 1.
- [3] 黄开基, 杨华. 基于深度学习特征的二维图像匹配算法综述[J]. 计算机工程, 2024, 50(10): 16-34.
- [4] 谷美颖, 李航, 张家伟, 等. 基于视觉的无人机定位与导航方法研究综述[J]. 电子学报, 2025, 53(3): 651-685.
- [5] DeTone, D., Malisiewicz, T. and Rabinovich, A. (2018) Superpoint: Self-Supervised Interest Point Detection and Description. 2018 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Salt Lake City, 18-22 June 2018, 337-349. <https://doi.org/10.1109/cvprw.2018.00060>
- [6] Dai, M., Hu, J., Zhuang, J. and Zheng, E. (2022) A Transformer-Based Feature Segmentation and Region Alignment Method for UAV-View Geo-Localization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **32**, 4376-4389. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2021.3135013>
- [7] Lee, J., Kim, B., Kim, S. and Cho, M. (2023) Learning Rotation-Equivariant Features for Visual Correspondence. 2023 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vancouver, 18-22 June 2023, 21887-21897. <https://doi.org/10.1109/cvpr52729.2023.02096>
- [8] 冯浩臻. 亚像素精度快速视觉导航方法的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [9] Sun, J., Shen, Z., Wang, Y., Bao, H. and Zhou, X. (2021) Loftr: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers. 2021 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, 19-25 June 2021, 8918-8927. <https://doi.org/10.1109/cvpr46437.2021.00881>
- [10] 刘庚辰, 姜梁, 吴国强, 等. 基于改进 SuperPoint 的空天异源图像匹配算法[J]. 电子学报, 2025, 53(4): 1201-1211.
- [11] Wang, Y., He, X., Peng, S., Tan, D. and Zhou, X. (2024) Efficient LoFTR: Semi-Dense Local Feature Matching with Sparse-Like Speed. 2024 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, 16-22 June 2024, 21666-21675. <https://doi.org/10.1109/cvpr52733.2024.02047>
- [12] Edstedt, J., Sun, Q., Bökman, G., Wadenbäck, M. and Felsberg, M. (2024) RoMa: Robust Dense Feature Matching. 2024 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, 16-22 June 2024, 19790-19800. <https://doi.org/10.1109/cvpr52733.2024.01871>
- [13] 刘奇霏, 吴国强, 黄坤, 等. 空天影像匹配技术研究[J]. 遥测遥控, 2026, 47(1): 148-157.
- [14] 陈娜, 白佳佳, 周祺胤, 等. 基于注意力与分层特征的图像特征点匹配算法[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(11): 2839-2852.

-
- [15] Liu, Y., Xia, C., Zhu, X. and Xu, S. (2022) Two-Stage Copy-Move Forgery Detection with Self Deep Matching and Proposal Superglue. *IEEE Transactions on Image Processing*, **31**, 541-555. <https://doi.org/10.1109/tip.2021.3132828>
- [16] 张永显, 薛源, 徐梦珍, 等. 融合多尺度学习型特征与注意力机制的多源遥感图像匹配[J]. *测绘科学技术学报*, 2025, 41(2): 163-172.
- [17] 杨云皓. 基于深度学习的大视角变换及大位移图像匹配算法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [18] 周嘉星, 陈志高, 高登巍, 等. 基于图像匹配的无人机侦察目标定位方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2025, 45(3): 287-294.
- [19] 熊子恒, 张轩雄. 基于深度学习的红外与可见光图像匹配[J]. *电子技*, 2025, 38(9): 1-8.