

基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法

张岩, 李建增, 李德良, 杜玉龙
(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 为了改善无人机侦察视频配准效果与速度, 提出一种基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法。首先提出基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法对视频帧之间配准, 然后提出匹配区域搜索方法在数字卫星地图上找到视频帧匹配区域, 最后将视频帧与匹配区域配准, 根据匹配区域二维关系计算单应矩阵完成拼接。实验结果表明, 基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法在尺度、旋转、视点等变化及运行速度上存在很大优势, 匹配区域搜索方法避免了定位定向系统带来的误差与引入控制点, 提高了纠正精度与速度。本配准方法对像素大小为 810×612 的视频拼接速度达到 25 帧/s, 在离地约 1000 m 的空中, 二维定位精度可达 7.87 m。

关键词: 景象匹配; 无人机; AGAST-Difference; 匹配区域搜索方法

中图分类号: TP391.4; TN957.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0030-06

A Fast Registration Method for UAV Videos Based on Scene Matching

ZHANG Yan, LI Jian-zeng, LI De-liang, DU Yu-long
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the effect and speed of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) reconnaissance video registration, a fast registration method based on scene matching is proposed. Firstly, a feature matching algorithm based on AGAST-Difference and Fast Retina Keypoint (FREAK) is proposed to match the video frames. Then, the matching region search method is proposed to find the matching region for the target frame in the satellite digital map. Finally, the video frame is registered to matching regions, and the homography matrix is calculated out according to 2D relationship of the matching regions for implementing the splicing. The experimental results show that: 1) The feature matching algorithm based on AGAST-Difference and FREAK has great advantages in scale, rotation, viewpoint and so on; and 2) The matching region search method can avoid the error caused by the Position and Orientation System (POS) and the introduction of control points, thus the correction accuracy and speed are improved. With the splicing speed up to 25 frames per second for videos of 810×612 resolution, the 2D localization accuracy of our algorithm for a ground target can reach 7.87 m when the UAV flies at about 1000 m above ground.

Key words: scene matching; UAV; AGAST-Difference; matching region search method

0 引言

近年来, 无人机摄像技术在各个领域得到飞速发展, 但侦察视频图幅较小, 机体抖动、噪声与大光照变化以及利用 POS 数据正射纠正不精确与地面控制点

难以获取等因素, 严重影响了视频配准效果与速度。因此, 研究一种无人机侦察视频快速配准方法具有重要的现实意义。

计算机视觉技术的迅猛发展, 使得航摄影像配准进入基于景象匹配的无人机航摄影像配准阶段, 重点为图像匹配技术, 近些年来特征匹配被广泛使用与研究^[1]。

在特征匹配方面, 学者们做了大量工作: LOWE 完善了经典的尺度不变特征转换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 检测子^[2], 该检测子在高斯差分空间 (Difference of Gaussian, DoG) 内计算极值产生候选点, 然

收稿日期: 2016-05-16 修回日期: 2017-02-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51307183); 军内科研基金 (ZS201507132A1208)

作者简介: 张岩 (1991—), 男, 黑龙江伊春人, 蒙古族, 博士生, 研究方向为无人机信息传输与处理技术。

后利用梯度直方图计算特征方向,具有照度、视点、JPEG 压缩、尺度与旋转不变性,但该检测子的实时性不高; BAY 等人提出了快速鲁棒性特征 (Speeded Up Robust Features, SURF) 检测子^[3],该检测子利用快速海森矩阵检测产生候选点,然后通过小波扇形环绕法定向,运行效率较高,但快速海森矩阵检测鲁棒性不强,对模糊变换、照度变换与 JPEG 压缩等敏感;同年,ROSTEN 等人在 SUSAN 检测子^[4]的基础上提出基于加速段检验的自适应通用角点 (Adaptive and Generic corner detection based on the Accelerated Segment Test, AGAST) 检测子^[5],与传统的角点检测子相比,在速度上具有明显优势,但对尺度、旋转与视点变换等较为敏感;LEUTENEGGER 提出了二进制鲁棒性尺度不变的特征 (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, BRISK) 检测子^[6],其利用 AGAST 检测特征点,使用长距离对迭代法定向,使检测速度大幅提升,但尺度空间构建没有进行滤波,该检测子各方面鲁棒性不强;2011 年,ALAHY 等人提出一种基于人眼视网膜的 FREAK (Fast Retina Keypoint) 描述子^[7],其本质也是二进制描述符,利用扫视匹配搜索,对于各种变换比 BRISK 描述子的鲁棒性均有提高,虽然处理速度稍有下降,但完全满足实时处理需求。

1 方法流程

本文提出一种基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法,配准方法流程如图 1 所示。

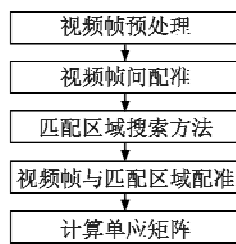


图 1 本文配准方法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

经过视频帧预处理后,首先采用基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法对视频帧之间配准,然后提出匹配区域搜索方法在数字卫星地图上找到视频帧匹配区域,最后将视频帧与匹配区域配准,根据匹配区域二维关系计算单应矩阵并完成拼接。

2 基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法

在众多特征检测器中,AGAST 的鲁棒性与速度优势是极为显著的^[8]。本文将 AGAST、尺度金字塔与长距离对迭代法相结合,提出 AGAST-Difference 检测子。

首先建立尺度空间金字塔,如图 2 所示。由交叉

排列的 n 个外层 C_i 与 n 个内层 d_i 构成,其中, C_0 层为原图像,由原图像经 1.5 倍降采样得到 d_0 层, C_i 层可由 C_{i-1} 层经过 0.5 倍降采样得到, d_i 由 d_{i-1} 层 0.5 倍降采样得到。

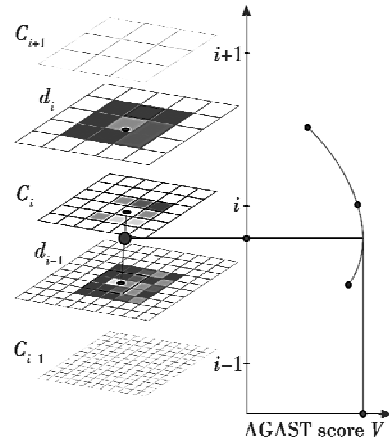


图 2 AGAST-Difference 的尺度空间

Fig. 2 Scale space in AGAST-Difference

在每一层利用 AGAST 进行检测后得到特征分数 V , 然后进行非极大值抑制,进而由亚像素级矫正得到候选点的亚像素级坐标,同时记录下候选点的尺度信息,最后通过长距离对迭代法^[6]赋予候选点方向特征得到特征点。

本特征匹配算法采用 FREAK 描述符作为特征描述子。FREAK 具备较强的 JPEG 压缩不变性、照度不变性、视点不变性、模糊不变性、旋转与尺度不变性。

再经过扫视匹配^[7]与渐进采样一致算法^[9] (Progressive Sample Consensus, PROSAC) 对匹配错误点进行剔除,便得到图像间的单应变换矩阵。

3 匹配区域搜索方法

由同名点对光学几何关系^[10]得

$$\begin{cases} \frac{X_a - X_l}{Z_a - Z_l} = \frac{a'_1(x_a - x_1) + b'_1(y_a - y_1) - c'_1 f_1}{a'_3(x_a - x_1) + b'_3(y_a - y_1) - c'_3 f_1} \\ \frac{Y_a - Y_l}{Z_a - Z_l} = \frac{a'_2(x_a - x_1) + b'_2(y_a - y_1) - c'_2 f_1}{a'_3(x_a - x_1) + b'_3(y_a - y_1) - c'_3 f_1} \\ \frac{X_a - X'_l}{Z_a - Z'_l} = \frac{a''_1(x_b - x_1) + b''_1(y_b - y_1) - c''_1 f_1}{a''_3(x_b - x_1) + b''_3(y_b - y_1) - c''_3 f_1} \\ \frac{Y_a - Y'_l}{Z_a - Z'_l} = \frac{a''_2(x_b - x_1) + b''_2(y_b - y_1) - c''_2 f_1}{a''_3(x_b - x_1) + b''_3(y_b - y_1) - c''_3 f_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_a, y_a) 与 (x_b, y_b) 为视频帧的同名点对; (X_a, Y_a, Z_a) 为待求得物点坐标; x_1 与 y_1 分别为像主点偏离像原点的距离; (X_l, Y_l, Z_l) 为摄影中心的地面坐标; f_1 为摄像焦距; 此时的 $a'_i, b'_i, c'_i (i = 1, 2, 3)$ 与 $a''_i, b''_i, c''_i (i = 1, 2, 3)$ 分别由吊舱转动参数俯仰角 ϕ 、翻滚角 ω 与航向角 κ 计算得出。

首先根据视频帧之间的实时匹配结果,获取同名点对,对视频帧间同名点的高程 Z_l 进行求解,然后赋予权重求取平均值,得到待定位区域的平均高程 \bar{Z}_l 。

然后推算视频帧的地面坐标,设视频帧4个角点的地面坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$, 则

$$\begin{cases} \frac{X_1 - X_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_1(-w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_1 f_2}{A_3(-w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_3 f_2} \\ \frac{Y_1 - Y_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_2(-w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_2 f_2}{A_3(-w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_3 f_2} \\ \frac{X_2 - X_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_1(w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_1 f_2}{A_3(w/2 - x_2) - B_3 y_2 - C_3 f_2} \\ \frac{Y_2 - Y_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_2(w/2 - x_2) - B_1 y_2 - C_2 f_2}{A_3(w/2 - x_2) - B_3 y_2 - C_3 f_2} \\ \frac{X_3 - X_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_1(w/2 - x_2) + B_1(h - y_2) - C_1 f_2}{A_3(w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3 f_2} \\ \frac{Y_3 - Y_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_2(w/2 - x_2) + B_2(h - y_2) - C_2 f_2}{A_3(w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3 f_2} \\ \frac{X_4 - X_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_1(-w/2 - x_2) + B_1(h - y_2) - C_1 f_2}{A_3(-w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3 f_2} \\ \frac{Y_4 - Y_v}{\bar{Z}_l - Z_v} = \frac{A_2(-w/2 - x_2) + B_2(h - y_2) - C_2 f_2}{A_3(-w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3 f_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: (X_v, Y_v, Z_v) 为摄影中心的地面坐标; f_2 为焦距; x_2 与 y_2 分别为像主点偏离像原点的距离; w 和 h 分别为图像的横、纵像素数; 视频帧的 $A_i, B_i, C_i (i=1, 2, 3)$ 由吊舱转动参数俯仰角 ϕ 、翻滚角 ω 与航向角 κ 计算得出。

为使定位区域最小且完全包含视频帧,设计如图3所示匹配区域。

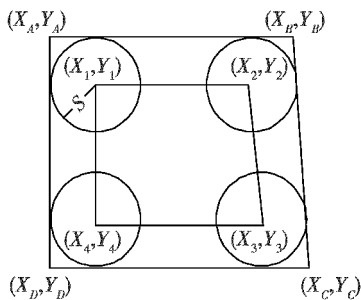


图3 匹配区域示意图

Fig. 3 The schematic diagram of matching area

图3中,视频帧4个角点地面坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$ 。以4个角点为圆心,以无人机利用空间2点交会定位误差距离 S 为半径做圆,连

接4个圆外切线交于4点,分别求出4点坐标 $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B), (X_C, Y_C), (X_D, Y_D)$, 即

$$\begin{cases} X_A = X_2 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}\right)^2 + 1}}{\frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2} - \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}} \\ Y_A = Y_2 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{X_3 - X_2}{Y_3 - Y_2}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}\right)^2 + 1}}{\frac{X_3 - X_2}{Y_3 - Y_2} - \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X_B = X_3 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{Y_4 - Y_3}{X_4 - X_3}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{Y_2 - Y_3}{X_2 - X_3}\right)^2 + 1}}{\frac{Y_4 - Y_3}{X_4 - X_3} - \frac{Y_2 - Y_3}{X_2 - X_3}} \\ Y_B = Y_3 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{X_4 - X_3}{Y_4 - Y_3}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{X_2 - X_3}{Y_2 - Y_3}\right)^2 + 1}}{\frac{X_4 - X_3}{Y_4 - Y_3} - \frac{X_2 - X_3}{Y_2 - Y_3}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_C = X_4 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{Y_1 - Y_4}{X_1 - X_4}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{Y_3 - Y_4}{X_3 - X_4}\right)^2 + 1}}{\frac{Y_1 - Y_4}{X_1 - X_4} - \frac{Y_3 - Y_4}{X_3 - X_4}} \\ Y_C = Y_4 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{X_1 - X_4}{Y_1 - Y_4}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{X_3 - X_4}{Y_3 - Y_4}\right)^2 + 1}}{\frac{X_1 - X_4}{Y_1 - Y_4} - \frac{X_3 - X_4}{Y_3 - Y_4}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} X_D = X_1 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{Y_4 - Y_1}{X_4 - X_1}\right)^2 + 1}}{\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} - \frac{Y_4 - Y_1}{X_4 - X_1}} \\ Y_D = Y_1 \pm S \frac{\sqrt{\left(\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{X_4 - X_1}{Y_4 - Y_1}\right)^2 + 1}}{\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} - \frac{X_4 - X_1}{Y_4 - Y_1}} \end{cases} \quad (6)$$

求出的每个 (X, Y) 的解有2个,取在4点构成四边形外的值,4点连线构成匹配区域。

将视频帧与该区域匹配求出单应矩阵,根据匹配区域二维关系计算所有待拼接视频帧的单应矩阵关系,经过全局单应矩阵优化后^[11],最终得到视频拼接图。由于数字卫星地图为正射影像,所以配准图亦为正射影像,从而简化了配准流程,提高了速度。

4 实验分析

4.1 AGAST-Difference 检测子的性能

为了衡量检测子的鲁棒性,同时便于与其他检测子

进行对比,本文处理了标准测试图集里的 Leuven 图像,同时通过复现率衡量检测子鲁棒性,结果如图4所示。

笔记本计算机配置:处理器为主频 2.5 GHz 的酷睿双核第4代 i7。操作系统为 Windows10 专业版 64 位系统,编程环境为 Visual Studio 2015 与 OpenCV 3.10(SIFT 与 SURF 是由 OpenCV 2.41 中提取加载的)。

由于利用 AGAST 计算特征分数比近似计算的 Fast-Hessian 在视点变换方面的鲁棒性有较大加强,弱于计算复杂的 DoG,所以 AGAST-Difference 对于视点鲁棒性介于 SURF 与 SIFT 两者之间。但 AGAST 对于灰度变化较为敏感,所以 AGAST-Difference 的照度与噪声不变性较弱。

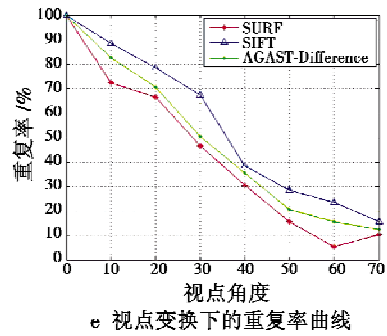
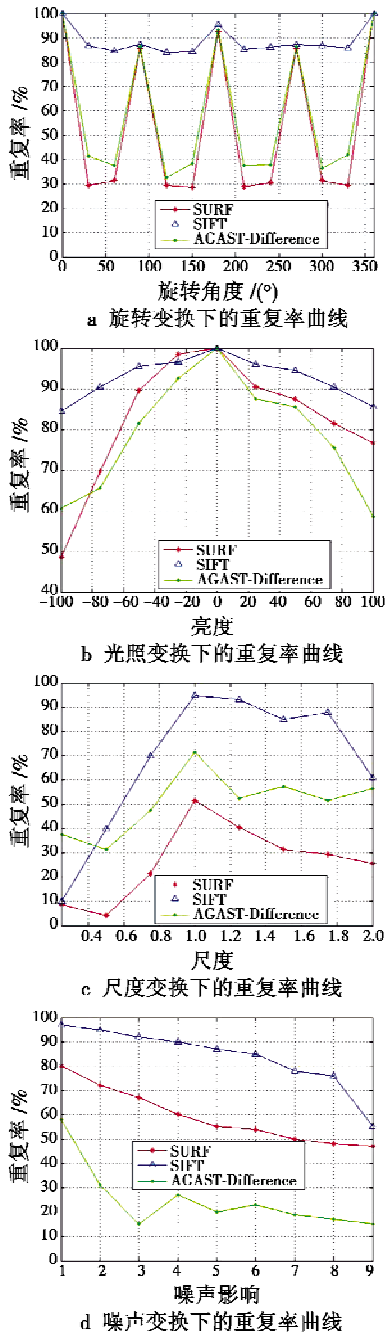


图4 不同变换条件下的重复率比较
Fig.4 Repeatability comparison under different transformations

AGAST-Difference 利用长距离对迭代法定向,该定向法的运行效率与鲁棒性较小波扇形环绕法都有提升,但鲁棒性还是弱于梯度直方图统计法,所以 AGAST-Difference 的旋转不变性介于 SURF 与 SIFT 之间。

由于 AGAST-Difference 采用了非整数倍降采样构建了尺度空间金字塔,且与 AGAST 计算特征分数合理结合,所以尺度不变性强于使用模板滤波与图像卷积的 SURF。但为提高检测子实时性避免了高斯滤波,因此尺度不变性弱于 SIFT。

综上所述,AGAST-Difference 检测子具有良好的鲁棒性。

关于 FREAK 描述子的性能优势,文献[7]做了详细的测试,对于照度变换、模糊变换、JPEG 压缩变换、视点变换、旋转与尺度变换,均比 SURF 与 SIFT 描述子的鲁棒性更强。

4.2 基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法的时间测试

特征匹配算法的运行效率是指在相同硬件平台上特征匹配算法的运行速度。所以在达到相同目标时,特征匹配算法所用时间与运行效率负相关。本实验分别统计了 SURF 特征匹配算法^[2]、SIFT 特征匹配算法^[3]以及本文特征匹配算法对 Graf 的第1、第3张图像(像素大小为 800 × 640)100次检测与描述所用的平均时间。

特征匹配算法耗时比较如表1所示。

表1 特征匹配算法耗时比较

Table 1 Time consumption of different methods

	总特征 点数	检测耗 时/ms	描述耗 时/ms	总耗时/ ms	每点耗 时/ms
SURF	1557	107.9	559.1	667.0	0.428
SIFT	1952	1723	917.1	2640.1	1.352
本文特征 匹配算法	1051	17.20	17.08	34.28	0.032

表1中分析耗时结果如下:检测子方面,由于本文

特征匹配算法重新构建了尺度空间,通过非整数倍降采样避免了高斯滤波,同时引入检测效率较高的 AGAST 计算特征分数,所以本文特征匹配算法的执行速度远高于 SURF 与 SIFT;描述子方面,经测试^[7],FREAK 的运行效率远高于 SURF 与 SIFT。

4.3 基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法测试

对某地区进行实验,技术参数如表 2 所示,取 100 张视频帧、谷歌数字卫星地图与相关 POS 数据,如表 3 所示。

表 2 实验影像技术参数

Table 2 Aerial photography and survey specifications

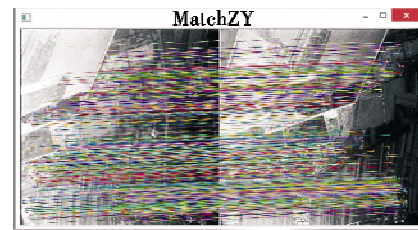
参数	数值
航摄时间	2015 年 8 月
航摄仪定焦/mm	24
飞行高度/m	1000
航摄仪	SONY NEX7,Zenmuse 云台系统
视频分辨率	810 × 612
摄像比例尺	1:1500
区域范围/km	3
最大地形起伏/m	173
GPS 数据更新率/s	1
GPS 数据初始化/min	3
GPS 静态观测/min	3
GPS 偏心分量/m	2.049, -0.501, 1.381
IMU 偏心分量/m	0.000, -0.201, 0.427

表 3 试验视频帧的 POS 数据

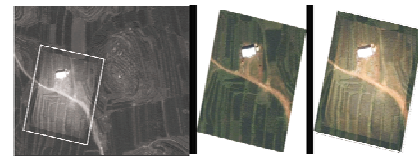
Table 3 The POS data of the test video frames

影像	X/m	Y/m	Z/m	$\phi/(\circ)$	$\omega/(\circ)$	$\kappa/(\circ)$
1	114.51	38.57	358.73	3.2	4.5	87.2
2	114.43	38.43	362.52	3.3	4.7	92.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

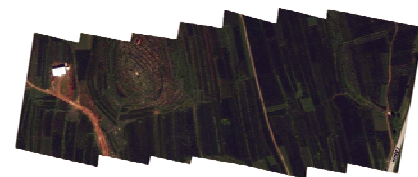
如图 5a 所示,利用本文特征匹配算法将视频帧匹配得到同名点。利用同名点与 POS 数据根据空中三角测量原理计算该区域平均高程。如表 4 所示,利用平均高程与视频帧外方位元素,通过式(2)计算视频帧 4 个角点 $A_1 \sim A_4$ 的地面坐标系二维坐标。按比例尺转换后,以无人机集成传感器定位误差距离作为误差半径,根据式(3)~式(6)计算出匹配区域 4 个角点 $B_1 \sim B_4$ 的二维坐标,同理计算所有视频帧的 4 个角点二维坐标。如图 5b 所示,在谷歌数字卫星地图中提取该区域并配准,取不同视频帧实验 100 次,平均用时 0.04 s。如图 5c 所示,计算所有待配准视频帧对应匹配区域二维坐标关系,经过全局单应矩阵优化,得到影像绝对单应矩阵,从而计算得到拼接图,结果见图 5d,平均每 5 张拼接用时 0.24 s。



a 视频帧配准获取同名点



b 提取匹配区域并配准



c 匹配区域二维坐标关系



d 侦察视频拼接结果

图 5 本文配准方法测试

Fig. 5 The test of proposed method

表 4 角点坐标值

Table 4 The coordinate values of the corner

角点编号	X/m	Y/m	角点编号	X/m	Y/m
A_1	114.51561	38.57732	B_1	114.51556	38.57739
A_2	114.51727	38.57712	B_2	114.51716	38.57714
A_3	114.51670	38.57535	B_3	114.51683	38.57522
A_4	114.51522	38.57561	B_4	114.51512	38.57559

4.4 拼接精度计算与分析

为了验证基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法的配准精度,分别采用文献[12]配准方法与本文配准方法对某地区进行实地测图。

首先验证特征匹配算法的性能,对其中 4 条航带进行实验,将 SIFT 和 SURF 特征匹配算法与本文特征匹配算法进行对比,通过正确匹配率^[13]来评判配准效果。

100 组匹配实验结果如图 6 所示。

SIFT 较为稳定,且正确匹配率最高,特别在运动模糊、强光照与大角度旋转时,表现出较好的鲁棒性,这得益于高斯差分尺度空间的构建与用梯度直方图统计法确定方向,但实时性不高。SURF 由于使用模板滤波与图像卷积,使得匹配速度大幅度提升,但正确匹配率低于 SIFT 与本文特征匹配算法,由于 SURF 对角度极为敏

感,所以不适用于大角度的遥感图像的匹配。AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法的正确匹配率与稳定性高于 SURF,与 SIFT 接近,特别是在尺度、视角、光照变换较大时存在很大优势,这是因为 AGAST-Difference 在特征检测阶段,构建了线性尺度空间,用 AGAST 进行检测,同时利用灰度质心法定向,增强了尺度、旋转与视点变换鲁棒性;在特征描述阶段,FREAK 描述子具备很强的照度不变性、模糊不变性、JPEG 压缩不变性、视点不变性、旋转与尺度不变性,所以匹配效果较好,且速度较快。

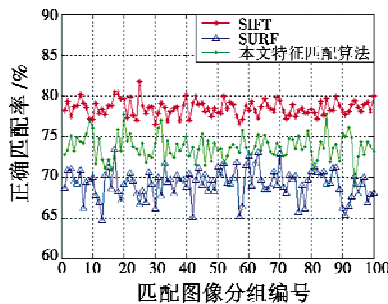


图 6 正确匹配率曲线

Fig. 6 Correct matching curves

其次,实验在 10 张配准图(10 张视频帧拼接而成)中量取明显的房角、墙角及电线杆等点位与实地同名点进行坐标对比统计,利用差分 GPS(平均误差为 0.1 m)求取实地同名点位坐标,共选取 100 个点测量目标位置的定位误差 S 与误差均方差(Root Mean Square Error, RMSE)对平面定位精度进行评价。定义 S 与 RMSE 分别为

$$S = \sqrt{(\hat{x}_k - x)^2 + (\hat{y}_k - y)^2} \quad (7)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(\hat{x}_k - x)^2 + (\hat{y}_k - y)^2]} \quad (8)$$

式中: (\hat{x}_k, \hat{y}_k) 为目标位置第 k 次测量值; (x, y) 为目标真实位置。

150 组定位实验结果如图 7 所示。

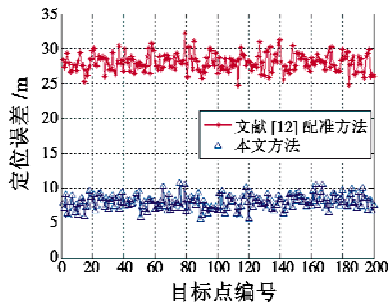


图 7 定位误差结果

Fig. 7 The results of positioning error

文献[12]配准方法 RMSE 为 21.35 m,最大偏差距离为 32.88 m,平均每 5 张拼接用时 14.325 s。本文配准

方法 RMSE 为 7.87 m,最大偏差距离为 11.32 m,平均每 5 张拼接用时 0.24 s。这是由于文献[12]配准方法使用 GPS 辅助数据进行正射纠正,而 GPS 辅助数据精度不高,同时无地面控制点数据,这会造成影像纠正精度低;而本文配准方法基于视频帧与数字卫星地图配准,同时引入全局单应矩阵优化,从而避免了 POS 系统带来的误差与引入控制点,提高了纠正精度与配准速度。文献[12]配准方法特征匹配是基于 SIFT 特征匹配算法,该特征匹配算法各种鲁棒性强,但计算复杂,实时性不高;而本文的基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法的正确匹配率高,稳定性强,速度方面存在很大优势,可以实现实时配准。

同时,文献[12]配准方法由于使用 GPS 辅助数据进行正射纠正,受拼接帧数影响较大,定位误差随拼接帧数增多而逐渐降低,最后趋于稳定,所以不适合视频帧数较少的配准,而本文配准方法由于底图为正射影像,所以定位误差受拼接帧数影响较小。

结果证明本文配准方法的配准精度与速度显著提高。

5 结论

本文提出一种基于景象匹配的无人机侦察视频快速配准方法,并通过实验进行了验证,本文工作如下:

- 1) 说明了目前无人机侦察视频提高配准效果与速度的必要性,同时以六旋翼无人机进行了实验;
- 2) 提出了基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法,并对其检测子进行了理论推导与实验验证,定量表现了该特征匹配算法鲁棒性与运行效率的优势;
- 3) 利用数字卫星地图应用广泛与定位准确的优势,提出了匹配区域搜索方法,提高了景象匹配的精度与速度,避免了 POS 系统带来的误差与引入控制点,同时引入全局单应矩阵优化方法,提高了纠正精度与速度。

参考文献

[1] 张岩,李建增,李德良,等. 一种改进的无人机航空影像配准方法[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 2185-2187.

[2] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[3] BAY H, TUYTELAARS T, VAN G L. SURF: speeded up robust features[C]//Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, 2006:404-417.

表1 不同类型激光器性能对比表

Table 1 Performance comparison of different type lasers

机载 DIRCM 系统性能需求	固体/光纤激光 泵浦光参量振荡器	量子级联激光器
高功率激光输出	优	优
多波段激光输出	优	良
光束质量	良	良
工作环境温度	差	良
体积小、重量轻、功耗低	差	优

3 结束语

中红外激光器是 DIRCM 系统能够成功干扰红外制导导弹的关键,为了实现对各类导引头的有效干扰,DIRCM 系统对激光器的输出功率、光束质量、激光波段、工作温度范围和体积重量等均有严格要求。从国外典型 DIRCM 使用中波红外激光器情况可看出,早期装备使用的是中波光参量振荡激光器,最新的 CIRCUM 系统将采用 QCL 激光器。QCL 激光器能够有效地减少 DIRCM 系统的体积重量,提高系统的整体性能,代表了 DIRCM 系统的中波红外激光器的主要发展方向。

参考文献

- [1] KOZLOVSKII V I, KOROSTELIN Y V, LANDMAN A I, et al. Pulsed Fe²⁺: ZnS laser continuously tunable in the wavelength range of 3.49 ~ 4.65 μm [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(1): 1-3.
- [2] ZHU G L, JU Y L, ZHANG C H, et al. High-power, high-quality ZGP OPO pumped by a Tm, Ho: GdVO₄ laser [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(6): 1341-1343.
- [3] ELDER I. High average power thulium fiber laser pumped

mid-IR source [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6738: 673804-1-673804-10.

- [4] MAULINI R, LYAKH A, TSEKOUN A G, et al. High power, high efficiency quantum cascade laser systems for directional infrared countermeasures and other defense and security applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 74830D-1-74830D-9.
- [5] SIJAN A. Development of military lasers for optical countermeasures in the mid-IR [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 748304-1-748304-14.
- [6] Selex ES Ltd. Type 160 infrared counter measures (IRCM) laser [EB/OL]. [2013-01-01]. www.selexgalileo.com/EL-EXGALILEO/UK/dsh202/121201/mjg.
- [7] 郑大壮. 美国陆军“通用定向红外对抗系统”(CIRCUM)项目取得重大进展 [J]. *轻兵器*, 2015, 20: 5.
- [8] HENRIKSSON M, SJÖQVIST L, STRÖMQVIST G, et al. Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7115: 711500-1-711500-10.
- [9] KOMINE H, FUKUMOTO J M, LONG W H, et al. Noncritically phase matched mid-infrared generation in AgGaSe₂ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 44-49.
- [10] ZHU G L, JU Y L, WANG T H, et al. A mid-IR 14.1 W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Tm, Ho: GdVO₄ laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(3): 120-212.
- [11] LI X, XU X J, SHANG Y P, et al. Study on high power continuous-wave mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9251: 92510A-1-92510A-4.

(上接第 35 页)

- [4] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [5] MAIR E, HAGER G D, BURSCHKA D, et al. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test [C]//*Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision*, 2010: 183-196.
- [6] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints [C]//*Proceedings of International Conference on Computer Vision*, IEEE, 2011: 2548-2555.
- [7] ALAHI A, ORTIZ R, VANDERGHEYNST P. FREAK: fast retina keypoint [C]//*Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2011: 510-517.

- [8] 张岩,李建增,李德良,等. 基于特征的遥感图像匹配技术研究 [J]. *无线电工程*, 2016, 46(2): 61-64.
- [9] 尚明姝. 一种基于改进 SURF 的图像配准方法 [J]. *微电子学与计算机*, 2014, 31(2): 125-128.
- [10] 张岩,李建增,李德良,等. 基于 POS 与图像匹配的无人机目标定位方法研究 [J]. *军械工程学院学报*, 2015, 27(1): 39-45.
- [11] 任超峰. 航空视频影像的正射影像制作关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [12] 宫阿都,何孝莹,雷添杰,等. 无控制点数据的无人机影像快速处理 [J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(2): 254-259.
- [13] WINDER S A J, BROWN M. Learning local image descriptors [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2007: 1-8.