

DOI:10.11918/202203105

基于尺度配准的航拍图像与卫星影像匹配方法

温育杜¹, 郭士增¹, 刘晟², 马琳¹

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

摘要: 随着无人机航拍技术的普及, 航拍图像在目标检测和跟踪的应用得到普遍研究, 而航拍图像与卫星影像的匹配研究相对较少。由于成像机理和成像视角的不同, 无人机航拍图像与卫星影像存在较大的尺度差异, 现有的图像匹配方法难以实现航拍图像与卫星影像的有效匹配。为了解决这一问题, 提出了一种实现具有大尺度差异的航拍图像与卫星影像匹配的方法。该方法通过卫星影像的经纬坐标信息和无人机航拍图像成像时刻的相机位姿信息, 对无人机航拍图像进行方向和尺度的配准; 然后利用航拍图像成像时刻的位置信息, 对卫星影像进行粗匹配, 得到包含航拍图像匹配区域在内的卫星影像子图; 再利用神经网络提取配准后的航拍图像与卫星影像子图的卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)特征, 并基于CNN特征实现航拍图像与卫星影像的精匹配。仿真实验结果表明, 本文所提方法能够有效的实现大尺度差异的航拍图像与卫星影像匹配。通过将本文匹配方法与现有图像匹配算法匹配精度的对比分析, 证明了本文匹配算法的有效性和优越性。

关键词: 航拍图像; 卫星影像; 图像匹配; 图像尺度配准

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)10-0019-08

Matching method between UAV images and satellite images based on scale registration

WEN Yudu¹, GUO Shizeng¹, LIU Sheng², MA Lin¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Chinese Aeronautical Radio Electronics Research, Shanghai 200233, China)

Abstract: While the application of UAV images in target detection and tracking has been widely studied amid the popularization of UAV aerial photography technology, there has been relatively few researches on the matching between UAV images and satellite images. Due to their different imaging mechanisms and viewpoints, there are large-scale differences between UAV images and satellite images. Effective matching between UAV images and satellite images are difficult to realize using existing image matching methods. In order to solve this problem, this paper proposes a method for matching UAV images with large-scale differences from satellite images. This method registers the direction and scale of UAV images using the longitude and latitude coordinate of satellite images and the camera pose information of UAV images. Using the position of the UAV images, the satellite images are then roughly matched to obtain the satellite sub-images including the UAV images matching area. The CNN features of the registered UAV images and satellite sub-images are then extracted using neural networks, and the precise matching between UAV images and satellite images is realized based on CNN features. Simulation results show that the proposed method can effectively match large-scale UAV images with satellite images. The comparison in terms of matching accuracy between this matching method and existing image matching algorithms show the effectiveness and superiority of this matching algorithm.

Keywords: UAV images; satellite images; image matching; image scale registration

近年来,随着无人机航拍技术的普及,航拍图像在目标检测^[1-3]、目标跟踪^[4-5]等各个领域得到广泛应用。无人机航拍图像与卫星影像进行匹配可以对无人机进行图像辅助定位或者实现航拍图像与卫星影像融合制作高清地图等,具有一定的应用价值。

但是由于成像机制的不同,实现无人机航拍图像与卫星影像的匹配存在着几个难点。

一方面是这2种图像之间的尺度差异极大。卫星影像是一种大尺度、宽视野图像,其单个像素点所覆盖的实际地面区域比较大。相对来说,无人机航

收稿日期: 2022-03-29; 录用日期: 2022-05-04; 网络首发日期: 2023-03-31

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230331.1607.016.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61971162, 41861134010); 航空科学基金(2020Z066015002); 国家重点研发计划(2022YFC3801100)

作者简介: 温育杜(1997—), 男, 硕士研究生; 马琳(1980—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 马琳, malin@hit.edu.cn

拍图像是一种小尺度、窄视野的图像,由于无人机飞行高度限制,航拍图像所覆盖的实际地面区域有限,其单个像素点所覆盖的区域较小。另一方面是 2 种图像之间的特征差异较大。由于成像机理、成像时间、成像角度以及光照等多方面的差异,航拍图像与卫星影像在地貌、颜色、亮度等多方面存在较大的特征差异,因而实现航拍图像与卫星影像的匹配具有较大的挑战。

目前,图像匹配技术主要可以分为基于特征的图像匹配和基于模板的匹配两类。基于特征的图像匹配技术有 SIFT^[6-7] 特征、SURF^[8-9] 特征以及 ORB^[10-11] 特征等,它们通过图像的局部特征来实现匹配,对图像的小尺度差异具有一定的鲁棒性。但是无法实现航拍图像与卫星影像这种具有大尺度差异图像的有效匹配。基于模板的匹配是目前应用比较广泛的图像匹配技术,文献[12]提出一种 BBS (best-buddies-similarity) 匹配算法,该方法通过将模板图像和搜索图像分为若干个小图像块,然后统计模板图像和参考图像中互为最近邻匹配的图像块数量作为相似度衡量标准。这种分块统计的匹配方式在一定程度上减小了图像遮挡对匹配结果的影响,但是对于存在微小扭曲形变的图像匹配没有适应能力。文献[13]提出一种 DDIS (deformable diversity similarity) 匹配方法,该方法充分考虑了模板图像与目标匹配区域之间的变形问题,对于存在复杂变形和遮挡变化等干扰具有较强的适应性,但是在非均

匀光照条件下的匹配鲁棒性不高。

现有的图像匹配方法在常用的匹配场景下具有较高的匹配精度,但是无法对尺度和特征都存在较大差异的航拍图像与卫星影像实现有效匹配。因此,本文提出了一种适应于具有大尺度差异的航拍图像与卫星影像匹配方法。该方法将航拍图像成像时刻的相机位姿参数与图像匹配结合起来,充分利用相机位姿参数对图像进行配准以减小尺度差异对匹配的影响;再基于 CNN 特征对配准后的图像进行匹配,从而能够有效地实现航拍图像与卫星影像的匹配。

1 航拍图像与卫星影像匹配概述

本文的目标是实现无人机航拍图像与卫星影像的匹配。由于航拍图像与卫星影像存在大尺度差异和旋转关系难以实现匹配,本文以卫星影像为基准,通过充分利用航拍图像相机成像时刻的位姿参数等信息来对航拍图像进行旋转和放缩操作,实现方向和尺度的配准,再将配准的航拍图像与卫星影像进行匹配。在匹配过程中,为了提高匹配效率,分两步对图像进行匹配。首先,利用航拍图像的相机位姿参数在卫星影像中找到航拍图像可能匹配的区域截取卫星子图得到一个粗匹配结果;然后,将卫星子图与配准的航拍图像输入到一个预训的 CNN 特征提取网络提取图像特征向量;最后基于 CNN 特征对航拍图像与卫星影像进行精匹配,具体匹配流程见图 1。

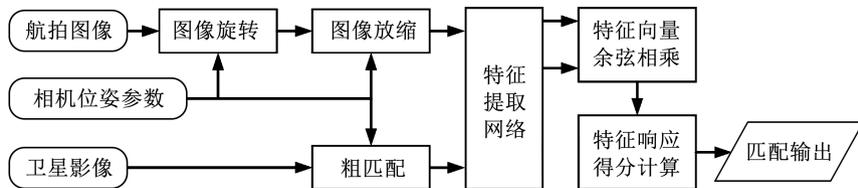


图 1 匹配方法流程图

Fig. 1 Flow chart of matching method

在图 1 的匹配方法流程中,航拍图像的配准以卫星影像为基准。首先通过相机的方位角确定航拍图像与卫星影像的旋转关系,并通过图像旋转实现两者方向校正。然后根据图像实际地面覆盖区域和像素尺寸关系分别计算出卫星影像和航拍图像单个像素点的地面覆盖区域大小,并通过图像重采样对航拍图像进行放缩,使得航拍图像与卫星影像单个像素点的地面覆盖区域大小一致,从而实现尺度空间的配准。在图像的粗匹配阶段,根据航拍图像成像时刻的相机位置参数和卫星影像的经纬坐标信息在卫星影像上截取包含航拍图像在内的卫星影像子

图作为粗匹配结果。在精匹配阶段,首先使用特征提取网络提取到航拍图像特征向量与卫星影像粗匹配结果的卫星子图特征向量;然后做余弦相乘并根据本文计算方法计算它们的特征响应得分;最后寻找特征响应得分最大的区域作为匹配区域,从而实现航拍图像与卫星影像的精匹配。

在本文中,卫星影像为俯拍成像,以图像水平方向为经度方向,垂直方向为纬度方向。航拍图像为无人机机载相机俯拍成像,以正北方向为航拍相机方位角 0° 方向,取顺时针方向为正值,逆时针方向为负值,航拍图像以卫星影像为基准的示意图 2。

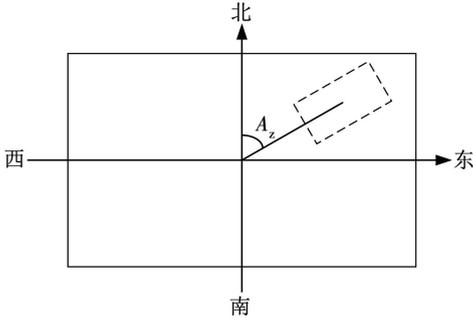


图 2 航拍图像与卫星影像旋转关系示意

Fig. 2 Schematic of rotation relationship between UAV image and satellite image

图 2 中实线框表示卫星影像, 虚线框表示航拍图像。根据示意图可见, 无人机航拍过程中, 航拍相机方位角 A_z 的改变会导致航拍图像与卫星影像之间存在旋转变换关系, 旋转关系的存在会影响航拍图像与卫星影像的匹配精度, 因此需要对航拍图像进行旋转方向的配准。

2 航拍图像与卫星影像匹配实现方法

2.1 基于相机位姿参数的航拍图像配准

航拍图像以卫星影像为基准, 首先进行方向配准, 然后进行尺度配准。本文通过解码图像成像时航拍相机的方位角 A_z , 然后将图像按方位角相反方向进行旋转实现图像的方向配准。图像旋转的本质是像素点坐标位置绕图像中心的旋转变换, 这一变化过程可以通过变换矩阵来实现。但是由于图像的像素坐标以图像左上角为原点, 因此图像变换前首先需要将图像由像素坐标系变换到图像中心坐标系, 具体变换关系见图 3。

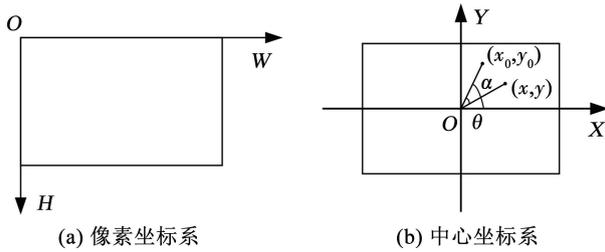


图 3 图像坐标关系

Fig. 3 Image coordinate relationship

根据图 3 所示的图像像素坐标系和中心坐标系

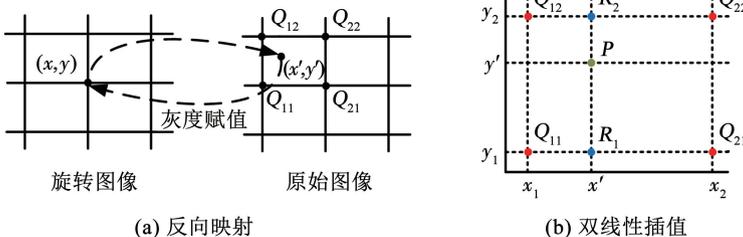


图 4 像素插值示意

Fig. 4 Schematic of pixel interpolation

的关系可得, 当假设图像高度为 H_u , 宽度为 W_u 时, 像素坐标系的一点 (X_0, Y_0) 变换到中心坐标系下的坐标为 (X, Y) , 其具体变换见式(1)。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.5W_u \\ 0 & -1 & 0.5H_u \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于图像的显示是基于像素坐标系的, 因此在图像中心坐标系下实现图像旋转后需要将中心坐标系下的坐标进行逆变换到像素坐标系下, 由图像中心坐标系变换到像素坐标系的变换见式(2)。

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.5W_u \\ 0 & -1 & 0.5H_u \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

图像在中心坐标系下实现旋转如图 3(b) 所示, 假设图中点 (x_0, y_0) 按顺时针方向旋转 θ 度后的坐标为 (x, y) , 根据几何关系可以写出坐标关系如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

综合上述推导, 图像像素坐标系下的一点 (X_0, Y_0) 绕图像中心顺时针旋转 θ 度后的坐标 (X'_0, Y'_0) 见式(4)。

$$\begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.5W_u \\ 0 & -1 & 0.5H_u \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.5W_u \\ 0 & -1 & 0.5H_u \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于图像的像素坐标为正整数, 经过旋转后的图像对像素坐标进行取整时会导致部分像素点没有灰度值而出现像素离散的现象。为了克服这一缺点, 本文采用反向映射和双线性插值^[14]的方式对变换后的图像进行处理。反向映射从旋转后的图像出发, 计算旋转后的像素坐标 (x, y) 在原图像中的坐标位置 (x', y') , 然后对其周围 4 个像素点的灰度值进行插值运算得到灰度值, 并将该灰度值赋值给旋转后的图像, 具体过程见图 4。

在图 4(b)所示的双线性插值中,点 P 的灰度值表示为 $f(P)$,首先对点 P 周围的 4 个像素点在 x 轴方向做 2 次线性插值得到在点 R_1 和 R_2 上的值,然后

$$f(P) = \frac{(y_2 - y')(x_2 - x')}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)}f(Q_{11}) + \frac{(y_2 - y')(x' - x_1)}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)}f(Q_{21}) + \frac{(y' - y_1)(x_2 - x')}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)}f(Q_{12}) + \frac{(y' - y_1)(x' - x_1)}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)}f(Q_{22}) \quad (5)$$

通过式 (5) 实现图像方向配准后,再对图像尺度进行配准,本文通过计算图像的实际地面覆盖距离与图像像素尺寸大小来计算图像尺度。首先计算卫星影像的实际地面覆盖距离,在图 5 的卫星影像中,影像左上角 A 的经纬坐标为 $(l_{A,lon}, l_{A,lat})$,右下角 B 的经纬坐标为 $(l_{B,lon}, l_{B,lat})$ 。由于所取的卫星影像地面覆盖区域大小相对于地球来说非常的小,因此可以忽略地球球面的影响,参考文献 [15] 的计算方式,在水平方向和垂直方向的地面覆盖区域 L_{ax} 和 L_{ay} 可以根据式 (6)、(7) 求解。

$$L_{ax} = |l_{B,lon} - l_{A,lon}| \cdot \frac{\cos(l_{lat}) \times (R - l_{lat} \times (R - r)/90) \times \pi}{180} \quad (6)$$

$$L_{ay} = |l_{B,lat} - l_{A,lat}| \cdot \frac{(R - l_{lat} \times (R - r)/90) \times \pi}{180} \quad (7)$$

式中: l_{lat} 为 A 、 B 两点纬度的均值, $R = 6\,378\,137\text{ m}$ 为地球赤道半径大小, $r = 6\,356\,752.314\text{ m}$ 为地球极轴半径大小。



图 5 卫星影像经纬坐标示意

Fig. 5 Longitude and latitude coordinates of satellite image

如图 6 所示,无人机航拍图像实际地面覆盖距离可以根据式 (8)、(9) 求解。

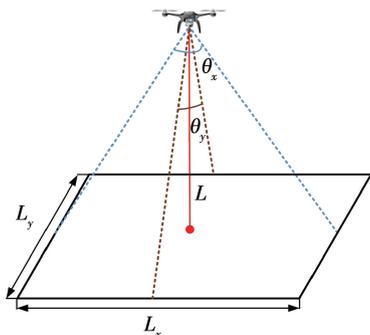


图 6 航拍图像地面覆盖区域计算

Fig. 6 Calculation of ground coverage area of UAV image

在 y 轴方向上做线性插值得到点 P 的灰度值,最终插值计算见式 (5)。

$$L_x = 2L \cdot \tan \frac{\theta_x}{2} \quad (8)$$

$$L_y = 2L \cdot \tan \frac{\theta_y}{2} \quad (9)$$

式中: L 为相机到地面的距离, $\theta_x \times \theta_y$ 为相机视场角大小。

假设卫星影像图像像素大小为 $H_a \times W_a$, H_a 为图像行像素点数, W_a 为列像素点数。相应地,无人机航拍图像像素大小为 $h \times w$ 。对于卫星影像可以计算出水平和垂直方向上单个像素点实际占据地面范围大小,见式 (10)、(11):

$$dU = \frac{L_{ax}}{W_a} \quad (10)$$

$$dV = \frac{L_{ay}}{H_a} \quad (11)$$

同理,根据无人机航拍图像地面覆盖区域长 L_x 和宽 L_y 以及图像的大小 $h \times w$ 可以求得航拍图像在水平和垂直方向上单位像素大小分别为 du 、 dv 。因此,航拍图像与卫星影像在水平和垂直方向上的尺度关系式 (12)、(13) 如下:

$$\sigma_x = \frac{du}{dU} \quad (12)$$

$$\sigma_y = \frac{dv}{dV} \quad (13)$$

得到航拍图像与卫星影像的尺度关系后,通过对航拍图像进行重采样实现尺度配准。假设无人机航拍图像重采样调整后的图像大小为 $h' \times w'$,其数值式 (14)、(15) 如下:

$$w' = \lfloor \sigma_x \cdot w \rfloor \quad (14)$$

$$h' = \lfloor \sigma_y \cdot h \rfloor \quad (15)$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为对数据向下取整。

2.2 基于分步的航拍图像与卫星影像匹配方法

在图像匹配阶段,本文采用粗匹配与精匹配结合的分步匹配方式。粗匹配以无人机航拍图像成像时刻记录的相机经纬位置信息 $(l_{T,lon}, l_{T,lat})$ 为航拍图像中心点的经纬位置,然后根据相机定位精度设定一个阈值 R_1 。在卫星影像中以航拍图像经纬度为中心,阈值 R_1 为半径在全局卫星影像中截取卫星子图作为与无人机航拍图像粗匹配的结果。卫星影像子图的选择示意图 7,其中虚线框区域为根据地

面覆盖区域距离计算以及阈值 R_i 大小选取的卫星影像子图区域。

经过粗匹配缩小匹配范围后的卫星影像子图与配准后的航拍图像进行精匹配。在精匹配阶段, 本文以配准后的航拍图像为模板图像 T , 卫星影像子图定义为搜索图像 S , 匹配的目标是在搜索图像中找到模板图像的最佳匹配区域。根据参考文献[16-17]定义一个特征匹配质量得分函数 $Q(s, t)$, 其中 t 和 s 分别是模板图像 T 和搜索图像 S 中的一小块区域, 它们对应的特征向量表示为 f_t 和 f_s 。

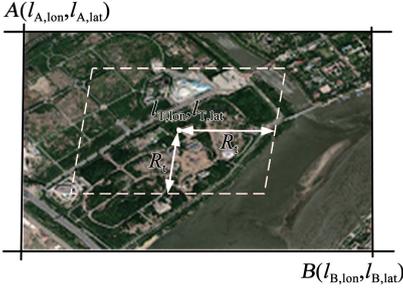


图 7 卫星影像子图截取示意

Fig. 7 Satellite image clipping

给定一个搜索图像 S 中的块区域 s , 然后定义模板图像 T 中的块区域 t 与之相匹配的概率为

$$P(t|s) = \frac{\exp\{\alpha \cdot \rho(f_t, f_s)\}}{\sum_{t' \in T} \exp\{\alpha \cdot \rho(f_{t'}, f_s)\}} \quad (16)$$

式中: α 为正权重, $\rho(\cdot)$ 为特征向量余弦相乘运算。 $P(t|s)$ 为当前块区域 t 相对于模板图像 T 中所有其他块区域与搜索图像 S 中块区域 s 的匹配程度的排序, 其值越大, 块区域 t 和块区域 s 匹配的可能性越高。

根据 $P(t|s)$ 的定义, 同理可以定义搜索图像 S 的一个块区域 s 与模板图像 T 给定块区域 t 的匹配概率为 $P(s|t)$, 因此特征匹配质量得分函数 $Q(s, t)$ 如下:

$$Q(s, t) = P(t|s) \cdot P(s|t) \quad (17)$$

得到特征匹配质量得分函数 $Q(s, t)$ 后, 根据整体匹配质量最优化原则, 在匹配质量得分函数中找出匹配质量得分响应极大值区域即为最佳匹配区域, 寻找最佳匹配区域为

$$R = \operatorname{argmax}_s \left\{ \sum_{s \in S} \max \{ Q(s, t) \mid t \in T \} \right\} \quad (18)$$

式中 R 为在搜索图像 S 中找到的与模板图像 T 的最佳匹配区域。

3 匹配方法性能分析

3.1 算法复杂度分析

假设配准后的航拍图像大小为 $T_w \times T_h \triangleq L$, 卫星影像大小为 $S_w \times S_h \triangleq L$, 经过本文粗匹配方法后得到的卫星影像子图大小为 $S_w' \times S_h' \triangleq L'$, 提取的特征

维度大小为 d 。根据匹配过程, 首先进行图像特征向量余弦相乘计算, 计算结果用一个 $L' \times l$ 维的矩阵 D 来存储, D_{ij} 表示块区域 s_i 和 t_j 特征向量余弦相乘的结果, 则其计算时间复杂度为 $O(L'ld)$, 内存占用复杂度为 $O(L'l)$ 。然后计算特征匹配质量得分函数 $Q(s, t)$, 根据 $Q(s, t)$ 的定义同样可以用一个 $L' \times l$ 维的矩阵 Q 来存储 $Q(s, t)$, 其计算时间复杂度为 $O(L'l)$, 内存占用复杂度为 $O(L'l)$ 。最后在 $Q(s, t)$ 中寻找匹配质量得分最高的匹配区域, 其寻找过程为首先在 Q 的每一行中寻找出最大值得到一个 $L' \times 1$ 的向量, 然后将向量维度调整为 $S_w' \times S_h'$ 维的得分矩阵, 最后以 $T_w \times T_h$ 为滑动窗口在得分矩阵中寻找得分最高的区域作为最佳匹配区域输出, 其计算的时间复杂度为 $O(L'l)$, 内存占用复杂度为 $O(L')$ 。

将上述复杂度进行综合并舍弃数量级较低的变量, 即可得到本文所提匹配算法总的时间复杂度为 $O(L'ld)$, 内存占用复杂度为 $O(L'l)$ 。根据文献[12], BBS 算法的时间复杂度为 $O(L^2d)$, 内存占用复杂度为 $O(L^2\sqrt{L})$ 。根据文献[13], DDIS 算法的时间复杂度为 $O(Ll + d'l \log l)$, 内存占用复杂度为 $O(L)$, 其中 d' 为特征向量 d 经过主成分分析算法降维后的特征维度大小。由于经过粗匹配后 $L' \ll L$, 因此相比于 BBS 算法和 DDIS 算法, 本文所提匹配算法在时间复杂度和内存占用复杂度上都具有较大的优势。

3.2 实验条件设置

航拍图像采集设备为大疆 MATRICE 200 V2 无人机, 搭载大疆禅思 X5S 云台相机。图像采集地点为哈尔滨工业大学田径场, 无人机航拍飞行高度为 100 m, 航拍图像像素大小为 $5\,280 \times 2\,970$, 对应的实际地面覆盖范围为 $115.33 \text{ m} \times 64.67 \text{ m}$ 。相应的卫星影像从 BIGEMAP 软件上下载, 其像素大小为 $1\,432 \times 879$, 对应的地面覆盖经纬坐标范围大小分别为: 经度 $126.624\,550^\circ \text{ E} \sim 126.632\,227^\circ \text{ E}$, 纬度 $45.734\,169^\circ \text{ N} \sim 45.738\,873^\circ \text{ N}$, 具体的航拍图像和卫星影像实例见图 8。

在本文实验中, 粗匹配阶段选取的阈值 R_i 大小为 150 m。在精匹配阶段利用在 ImageNet 上预训练的 VGG19 网络来提取图像 CNN 特征。为了客观地评价本文所提算法的优势, 本文将匹配结果与现有的优秀模板匹配算法 BBS 和 DDIS 进行比较, 并利用匹配结果与真实匹配位置的交并比 I_{IoU} (intersection over union, IoU) 来定性评价图像匹配质量的好坏, I_{IoU} 的具体定义公式如下:

$$I_{\text{IoU}} = \frac{S_{AB}}{S_A + S_B - S_{AB}} \quad (19)$$

式中: S_A 为真实匹配位置面积, S_B 为匹配结果位置

面积, S_{AB} 为匹配结果和真实匹配的交叠部分面积。

影像进行匹配分析, 具体匹配结果见图 9。

3.3 结果分析

本次实验共采集了 8 张无人机航拍图像与卫星

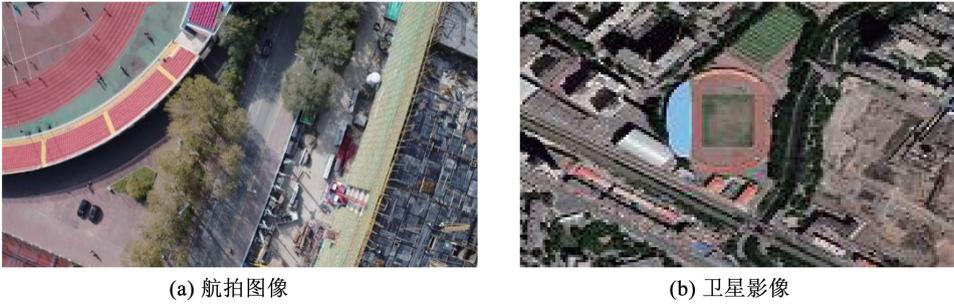


图 8 图像实例

Fig. 8 Image example

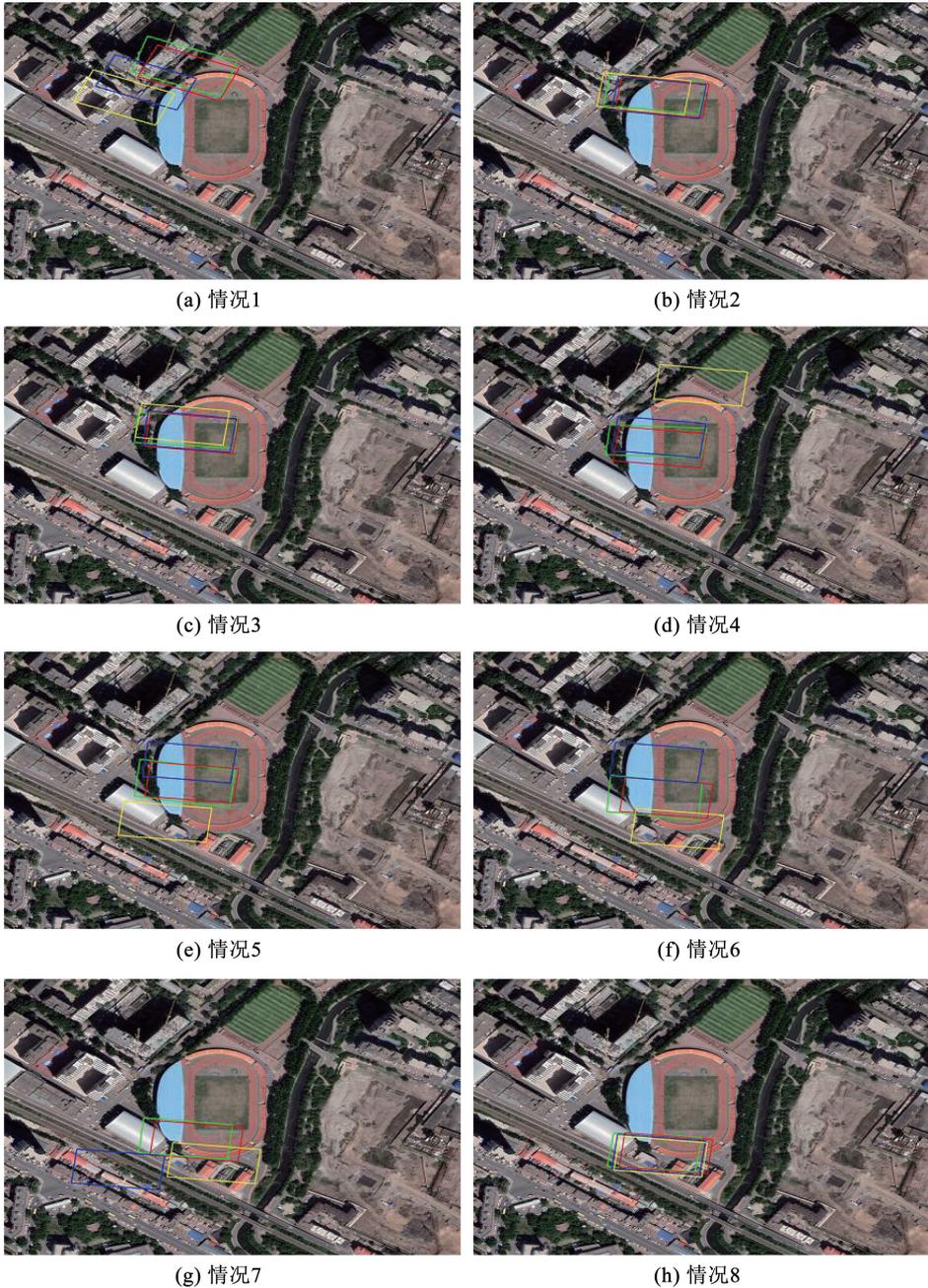


图 9 实验结果比较

Fig. 9 Comparison of experimental results

在图 9 中,绿色框为航拍图像与卫星影像匹配的真值框,蓝色框为 BBS 算法匹配结果,黄色框为 DDIS 算法匹配结果,红色框为本文所提算法匹配结果。在航拍图像与卫星影像方向和尺度严格配准的情况下,红色匹配框与绿色真值框的形状应该是一种面积等大,边界平行的关系。通过对比匹配结果的红色匹配框和绿色真值框之间的方向和大小关系可见,利用相机位姿参数进行方向和尺度配准的航拍图像与卫星影像之间是存在一定畸变的。这是因为无人机在航拍过程中存在抖动以及风力干扰等因素导致相机位姿参数存在一定的偏差,使得配准结果存在微小畸变,影响图像匹配的精度,从而导致匹

配结果红色框和绿色真值框之间存在一定的匹配误差。从匹配结果来看,在存在微小畸变的情况下,本文利用 CNN 特征进行匹配的结果仍然能够定位到图像的匹配位置,说明所提的匹配算法具有一定的图像畸变鲁棒性。

通过图 9 所示 3 种图像匹配方法比较结果可见,本文所提的匹配方法能够很好的匹配到航拍图像的真实匹配区域,而 BBS 算法和 DDIS 算法仅有少数情况下能够实现匹配,其误匹配现象比较严重。3 种匹配方法的匹配结果 I_{IoU} 评估计算见表 1,情况 1~8 为图 9 中的 8 种不同情况。

表 1 实验结果 I_{IoU} Tab.1 Experimental results of I_{IoU}

方法	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4	情况 5	情况 6	情况 7	情况 8	平均值
BBS[12]方法	0.12	0.75	0.79	0.71	0.24	0.01	0	0.80	0.43
DDIS[13]方法	0	0.75	0.63	0	0	0.07	0.13	0.69	0.28
本文方法	0.67	0.74	0.76	0.64	0.78	0.72	0.72	0.75	0.72

由表 1 可见,虽然在个别情况下 BBS 和 DDIS 匹配结果的 I_{IoU} 高于本文所提算法,但是本文所提算法匹配结果的 I_{IoU} 都在 0.6 以上,而 BBS 和 DDIS 均出现 I_{IoU} 为 0 的不可匹配的情况,并且本文所提算法匹配结果的 I_{IoU} 均值远高于 BBS 算法和 DDIS 算法。这说明本文算法在匹配大尺度差异的航拍图像与卫星影像上具有较高的鲁棒性,能够很好的适应图像尺度差异变化对图像匹配结果的影响。由此证明了本文所提的图像匹配方法在匹配具有大尺度差异的航拍图像与卫星影像场景下具有较大的优越性。

4 结 论

提出了一种实现具有大尺度差异的航拍图像与卫星影像匹配方法。该方法以卫星影像为基准,根据航拍相机的位姿参数对航拍图像进行方向和尺度空间的配准,然后根据航拍位置信息在卫星影像中截取出卫星子图与配准后的航拍图像进行匹配。实验仿真分析结果表明,现有图像匹配算法在匹配尺度差异较大的航拍图像与卫星影像时存在比较严重的误匹配现象,它们匹配结果 I_{IoU} 均值都在 0.5 以下,而本文所提算法匹配结果 I_{IoU} 均值为 0.72,远高于现有的图像匹配算法。说明本文所提算法具有较高的鲁棒性,能够较好的实现尺度差异较大的航拍图像与卫星影像的匹配。这对于航拍图像与卫星影像融合、无人机基于卫星影像的辅助视觉定位以及目标跟踪等应用领域具有较大的应用价值。

参考文献

- [1] 徐坚, 谢正光, 李洪均. 特征平衡的无人机航拍图像目标检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2022: 1
XU Jian, XIE Zhengguang, LI Hongjun. Target detection algorithm of UAV aerial image based on feature balance [J]. Computer Engineering and Application, 2022: 1
- [2] XING Chen, LIANG Xi, MA Yanna. A solution to improve object detection for images captured by UAV-mounted camera [C]// International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). Dalian: IEEE, 2019: 317. DOI: 10.1109/ICCSNT47585.2019.8962431
- [3] JIN Ren, LÜ Junning, LI Bin, et al. Toward efficient object detection in aerial images using extreme scale metric learning[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56214. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3072067
- [4] WEI Quanlu, LAO Songyang, BAI Liang. Panorama stitching, moving object detection and tracking in UAV videos [C]// International Conference on Vision, Image and Signal Processing (ICVISP). Osaka: IEEE, 2017: 46. DOI: 10.1109/ICVISP.2017.13
- [5] BAYKARAH C, BIYIK E, GÜL G, et al. Real-time detection, tracking and classification of multiple moving objects in UAV videos [C]// International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). Boston: IEEE, 2017: 945. DOI: 10.1109/ICTAI.2017.00145
- [6] AKHYARR M, TJANDRASA H. Image stitching development by combining SIFT detector and SURF descriptor for aerial view images [C]// International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS). Surabaya: IEEE, 2019: 209. DOI: 10.1109/ICTS.2019.8850941
- [7] ZHONG Bing, LI Yubai. Image feature point matching based on improved SIFT algorithm [C]// International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Xiamen: IEEE, 2019: 489. DOI: 10.1109/ICIVC47709.2019.8981329

[8] HUI Dong, YUAN Handian. Research of image matching algorithm based on SURF features[C]//International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP). Xi'an; IEEE, 2012; 1140. DOI: 10.1109/CSIP.2012.6309059

[9] CHENG Cheng, WANG Xuzhi, LI Xiangjie. UAV image matching based on surf feature and harris corner algorithm[C]//International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC). Shanghai; IET, 2017; 1. DOI: 10.1049/cp.2017.0116

[10] LI Shuo, WANG Zhiqiang, ZHU Qing. A research of ORB feature matching algorithm based on fusion descriptor [C]//IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. Chongqing: IEEE, 2020; 417. DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141770

[11] IMSAENG SUK T, PUMRIN S. Feature detection and description based on ORB algorithm for FPGA-based image processing[C]//International Electrical Engineering Congress (iEECON). Pattaya; IEEE, 2021; 420. DOI: 10.1109/iEECON51072.2021.9440232

[12] ORON S, DEKEL T, XUE T, et al. Best-buddies similarity—robust template matching using mutual nearest neighbors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(8): 1799. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2737424

[13] TALMI I, MECHREZ R, ZELNIK-MANOR L. Template matching with deformable diversity similarity [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017; 1311. DOI: 10.1109/CVPR.2017.144

[14] FLYING J. 图像旋转的插值算法[OL/Z]. (2021-01-14)[2022-04-11]. https://blog.csdn.net/m0_46191887/article/details/112603091

FLYING J. Interpolation algorithm for image rotation [OL/Z]. (2021-01-14) [2022-04-11]. https://blog.csdn.net/m0_46191887/article/details/112603091

[15] 黎珍惜, 黎家勋. 基于经纬度快速计算两点间距离及测量误差[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(11): 235

LI Zhenxi, LI Jiaxun. Fast calculation of distance between two points and measurement error based on longitude and latitude[J]. Mapping and Spatial Geographic Information, 2013, 36(11): 235

[16] ZHANG Ruixiang, XU Fang, YU Huai, et al. Edge-driven object matching for UAV images and satellite SAR images [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa; IEEE, 2020; 1663. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324021

[17] CHENG J, WU Y, ABD-ALMAGEED W, et al. QATM: Quality-aware template matching for deep learning [C]//IEEE CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach; IEEE, 2019; 11545. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01182

(编辑 苗秀芝)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“基于近邻搜索空间提取的 LOF 算法”,是清华大学自动化系智能与网络化系统研究中心赵千川教授课题组提出的一种异常检测算法示意图。针对局部异常因子(local outlier factor, LOF)异常检测算法时间空间复杂度高、对交叉异常及低密度簇周围异常点不敏感等局限,论文提出了基于近邻搜索空间提取的 LOF 异常检测算法(isolation-based data extracting LOF, iDELOF),将基于隔离思想的近邻搜索空间提取(isolation-based KNN search space extraction, iKSSE)模块,前置于 LOF 算法,以高效剪切掉大量无用以及干扰数据,获得更加精准的搜索空间。从图中可以看出该算法通过拉大正正常点局部离群因子的差距,增强对交叉异常以及低密度簇周围异常点的识别能力,提升了 LOF 的检测效果;同时该算法通过 iKSSE 所获数据搜索子集显著小于原数据集,显著降低了 LOF 的时间空间复杂度。

(图文提供:王若雨,赵千川,杨文.清华大学自动化系)