



主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2016
07
VOL.21

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



人脸图像处理 P865



第21卷第7期（总第243期）

2016年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 顾行发
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

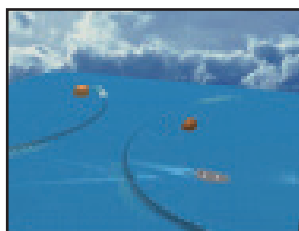
Editor-in-Chief Gu Xingfa
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

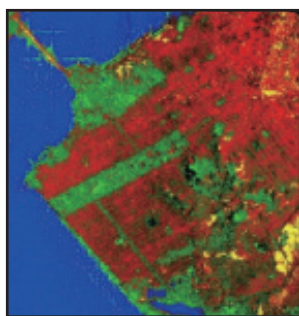
CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



大规模柔体的连续碰撞检测算法(第901页)



大规模流体场景的真实感与实时模拟(第913页)



星载SAR影像上船舶方位向模糊去除算法(第951页)

图像处理和编码

低存储化压缩感知

王金铭, 叶时平, 徐振宇, 蒋燕君 835

3D-HEVC深度图像快速帧内编码方法

张洪彬, 伏长虹, 陈锐霖, 萧允治, 苏卫民 845

加权KNN的图文数据融合分类

康丽萍, 孙显, 许光奎 854

结合肤色分割与平滑的人脸图像快速美化

邱佳梁, 戴声奎 865

图像分析和识别

级联型P-RBM神经网络的人脸检测

叶学义, 陈雪婷, 陈华华, 顾亚风, 吕秋云 875

结合全局与局部信息活动轮廓的非同质图像分割

郝智慧, 郭满才, 宋杨杨 886

计算机图形学

带参数的多项式势函数与构造基于Metaball的过渡曲线

李军成, 宋来忠, 刘成志 893

大规模柔体的连续碰撞检测算法

周清玲, 刘艳, 程天翔 901

虚拟现实与增强现实

大规模流体场景的真实感与实时模拟

邵绪强, 杨晓丹, 李继荣, 阎蕾 913

医学图像处理

形状约束下活动轮廓模型冠脉血管图像多尺度分割

郭笑妍, 梅雪, 李振华, 曹佳松, 周宇 923

遥感图像处理

深度置信网络在极化SAR图像分类中的应用

邓磊, 付姗姗, 张儒侠 933

高光谱图像低秩表达与噪声水平估计

唐中奇, 付光远, 赵晓林, 陈进, 张利 942

星载SAR影像上船舶方位向模糊去除算法

邴磊, 邢前国, 邹娜娜, 李圳波, 吴樊 951

TDFA: 一种生成空间影像金字塔的方法

张云舟, 张陌, 王晋年, 张刚 959

无人机侦察视频超分辨率重建方法

张岩, 李建增, 李德良, 杜玉龙 967

CONTENTS

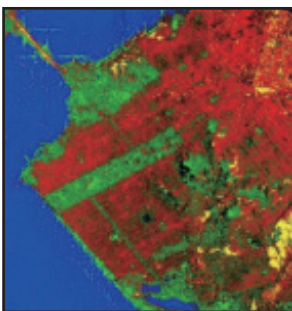
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Continuous collision detection algorithm for large-scale deformable objects (P901)



Realistic and real-time simulation of large-scale fluids (P913)



Application of deep belief network in polarimetric SAR image classification (P951)

Image Processing and Coding

- Reducing the storage space of the measurement matrix for compressive sensing
Wang jinming, Ye shiping, Xu zhenyu, Jiang yanjun 835
- Fast intra coding for depth map in 3D-HEVC
Zhang Hongbin, Fu Changhong, Chan Yuilam, Siu Wanchi, Su Weimin 845
- Fusion method via KNN with weight adjustment for the classification of image-text co-occurrence data
Kang Liping, Sun Xian, Xu Guangluan 854
- Fast facial beautification algorithm based on skin-color segmentation and smoothness
Qiu Jialiang, Dai Shengkui 865

Image Analysis and Recognition

- Cascaded probability state-restricted Boltzmann machine for face detection
Ye Xueyi, Chen Xueting, Chen Huahua, Gu Yafeng, Lyu Qiuyun 875
- Inhomogeneous image segmentation based on active contours with global and local information
Hao Zhihui, Guo Mancai, Song Yangyang 886

Computer Graphics

- The polynomial potential function with a parameter and transition curve based on Metaball technology
Li Juncheng, Song Laizhong, Liu Chengzhi 893
- Continuous collision detection algorithm for large-scale deformable objects
Zhou Qingling, Liu Yan, Cheng Tianxiang 901

Virtual Reality and Augmented Reality

- Realistic and real-time simulation of large-scale fluids
Shao Xuqiang, Yang Xiaodan, Li Jirong, Yan Lei 913

Medical Image Processing

- Multi-scale segmentation of coronary artery image based on active contour model with shape constraints
Guo Xiaoyan, Mei Xue, Li Zhenhua, Cao Jiasong, Zhou Yu 923

Remote Sensing Image Processing

- Application of deep belief network in polarimetric SAR image classification
Deng Lei, Fu Shanshan, Zhang Ruxia 933
- Low-rank representation for hyperspectral image noise level estimation
Tang Zhongqi, Fu Guangyuan, Zhao XiaoLin, Chen Jin, Zhang Li 942
- Azimuth ambiguity removal method for ship detection based on spaceborne SAR images
Bing Lei, Xing Qianguo, Zou Nana, Li Zhenbo, Wu Fan 951
- TDFA: a generation method of spatial image pyramid
Zhang Yunzhou, Zhang Mo, Wang Jinnian, Zhang Gang 959
- Super-resolution reconstruction for UAV video
Zhang Yan, Li Jianzeng, Li Deliang, Du Yulong 967

中图法分类号: TN957.52; TP751; TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)07-967-10

论文引用格式: Zhang Y, Li J Z, Li D L, Du Y L. Super-resolution reconstruction for UAV video[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(7): 967-976. [张岩, 李建增, 李德良, 杜玉龙. 无人机侦察视频超分辨率重建方法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(7): 967-976.] [DOI: 10.11834/jig.20160715]

无人机侦察视频超分辨率重建方法

张岩, 李建增, 李德良, 杜玉龙

军械工程学院, 石家庄 050003

摘要: **目的** 无人机摄像资料的分辨率直接影响目标识别与信息获取, 所以摄像分辨率的提高具有重大意义。为了改善无人机侦察视频质量, 针对目前无人机摄像、照相数据的特点, 提出一种无人机侦察视频超分辨率重建方法。**方法** 首先提出基于 AGAST-Difference 与 Fast Retina Keypoint (FREAK) 的特征匹配算法对视频目标帧与相邻帧之间配准, 然后提出匹配区域搜索方法找到目标帧与航片的对应关系, 利用航片对视频帧进行高频补偿, 最后采用凸集投影方法对补偿后视频帧进行迭代优化。**结果** 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, 匹配区域搜索方法使无人机视频的高频补偿连续性更好, 凸集投影迭代优化提高了重建的边缘保持能力, 与一种简单有效的视频序列超分辨率复原算法相比, 本文算法重建质量提高约 4 dB, 运行速度提高约 5 倍。**结论** 提出了一种针对无人机的视频超分辨率重建方法, 分析了无人机视频超分辨率问题的核心所在, 并且提出基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法与匹配区域搜索方法来解决图像配准与高频补偿问题。实验结果表明, 本文算法强化了重建图像的一致性与保真度, 特别是对图像边缘细节部分等效果极为明显, 且处理速度更快。

关键词: 超分辨率视频重建; 无人机; AGAST-Difference; 匹配区域搜索方法; fast retina keypoint (FREAK); 凸集投影

Super-resolution reconstruction for UAV video

Zhang Yan, Li Jianzeng, Li Deliang, Du Yulong

Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

Abstract: Objective The resolution of unmanned aerial vehicle (UAV) video has a direct effect on target recognition and information acquisition, thereby playing a highly significant role in improving video resolution. Currently, super-resolution reconstruction for UAV is proposed to improve the quality of UAV reconnaissance video for the characteristics of the UAV camera and camera data. **Method** The feature matching algorithm based on AGAST-Difference and Fast Retina Keypoint (FREAK) is primarily proposed to match the video object frame and the adjacent frames. Then, the matching region search method is proposed to find the corresponding relationship between the target frame and the aerial image, and aerial photographs are used to make high-frequency compensation of video frame. Finally, solving the optimization of video compensated by the proposed iteration steps utilizes the Projection Onto Convex Sets (POCS) method. **Result** Experimental results show that the feature matching algorithm based on AGAST-Difference and FREAK has significant advantages in scale, rotation, and viewpoint. The matching region search method improves the high-frequency compensation continuity of UAV video.

收稿日期: 2016-01-21; 修回日期: 2016-03-02

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

第一作者简介: 张岩 (1991—), 男, 军械工程学院控制科学与工程专业博士研究生, 主要研究方向为无人机信息传输与处理技术。

E-mail: hillwind@126.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51307183)

o. POCS iterative optimization improves the reconstruction capability of edge preservation. Compared with the algorithm presented in A Simple & Effective Video Sequence Super-Resolution Algorithm, the algorithm in this study is approximately five times faster, and its image reconstruction is improved by approximately 4 dB. **Conclusion** In this study, super-resolution reconstruction for UAV video is presented, and the core of the UAV video super-resolution is analyzed. The feature matching algorithm based on AGAST-Difference and FREAK as well as the matching region search method are proposed to solve problems of image registration and high-frequency compensation. The experimental results show that the consistency and fidelity of the reconstructed image are enhanced, the effect of the image edge detail is especially extremely obvious, and the processing speed is fast.

Key words: super-resolution; unmanned aerial vehicle; AGAST-Difference; matching region search method; fast retina keypoint (FREAK); projection onto convex sets (POCS)

0 引言

近年来,由于无人机摄像可实时、动态地监控目标,无人机摄像及照相技术各个领域得到飞速的发展,而摄像资料的分辨率直接影响目标的识别、信息的获取,因此无人机摄像分辨率的提高以及动态视频序列的超分辨率复原在无人机研究领域具有非常重要的意义^[1]。无人机传感器能同时提供静止图像和动态视频,并且动态视频的分辨率远低于静止图像。因此借鉴同一场景中的高分辨率静止图像对于动态视频的超分辨率重建具有非常重要的意义。

图像空间分辨率是图像质量的关键性指标之一。近些年来很多学者认为,超分辨率技术是提高图像分辨率的一种有效途径。超分辨率的概念最早是由 Harris 与 Goodman 等人于 20 世纪 60 年代提出的。其主要分为两类:空间域方法和频率域方法。空间域方法具有很强的先验约束力,包含更一般的图像退化模型、运动模型和马尔可夫随机场以及凸集约束等先验知识,这样在超分辨率重建过程中可以产生带宽外推影响。

国外学者 Phamto 等人^[2]在 1995 年根据同一场景的高分辨率图像,通过快速傅里叶变换,在频域进行块匹配运算,得到高频信息用于复原图像块,但保真度较低。2009 年王素玉等人^[3]提出了一种基于高分辨率参考图像的简单有效的视频序列超分辨率复原方法。该方法提取同一场景高分辨率静止图像的高频细节,用于低分辨率序列各帧的超分辨率复原,并采用最大后验概率约束优化。但频带分解方法得到的高频细节与低分辨率图像在低频上连续性较差,运动估计方法对匹配块尺寸具有依赖性^[4],

约束优化算法虽然收敛的稳定性高,但边缘保持能力还需进一步提高。

1 算法流程

本文利用无人机航片解决无人机侦察视频分辨率提高的问题,以 JWP02 型中程通用无人机飞机航片与侦察视频为例,JWP02 型无人机机动快速,但易受干扰,所以侦察视频有时抖动较大,特别是转换跟踪目标时,边缘与细节失真严重;航片拍摄周期相对较长,所获影像相对稳定。所以对于同一地物,航片与侦察视频间分辨率相差较大,侦察视频帧与帧之间视点变换、角度变化较大,同时存在运动模糊问题与噪声问题。归结起来,影像匹配的关键是解决尺度变化、视点变化与角度变化问题^[5],超分辨率重建主要是解决边缘细节与实时性问题。而传统超分辨率重建算法存在的问题有:频带分解方法得到的高频细节与低分辨率图像在低频上连续性较差,运动估计方法对匹配块尺寸具有依赖性,约束优化算法虽然收敛的稳定性高,但边缘保持能力还需进一步提高。所以改良超分辨率重建算法的鲁棒性与实时性问题,其重点是解决频带分解连续性、运动估计、边缘保持能力的问题。

针对以上问题,以及目前无人机摄像与照相数据的特点,提出一种无人机侦察视频超分辨率重建方法,算法流程如图 1。首先采用基于 AGAST-Difference 与 FREAK (fast retina keypoint) 的特征匹配算法对视频目标帧与相邻帧之间配准,然后根据匹配区域搜索方法进行粗定位找到目标帧与航片的对应关系,利用包含目标帧地物的航片对视频帧进行高频补偿,最后采用凸集投影方法对补偿后视频帧进行迭代优化。

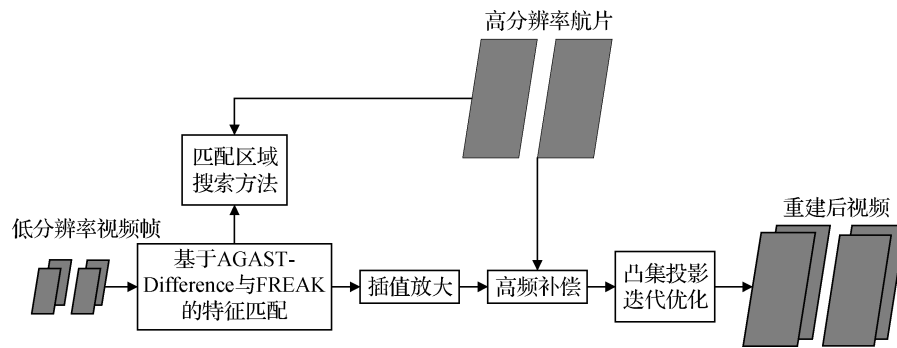


图1 算法示意图

Fig. 1 Diagram of the proposed algorithm

2 基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法

图像配准的精度与速度直接影响超分辨率重建的质量与实时性,研究一种快速准确的匹配算法是解决问题的关键。AGAST(adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test)^[6]是公认的效率较高的特征点检测算法,在FAST(features from accelerated segment test)^[7]的基础上进一步提高了检测效率。其具备旋转和光照不变性,却不具备尺度不变性,本文将AGAST与DoG(difference of Gaussians)结合,提出一种新的AGAST-Difference特征点检测方法。

首先利用Wallis滤波与灰度均匀化减弱噪声与光照影响,其次建立尺度空间金字塔:尺度空间金字塔由 n 个外层 c_i 和 n 个内层 d_i 组成, $i=0,1,\dots,n-1$ 。第1外层 c_0 为原始图像,第1内层 d_0 为 c_0 1.5倍降采样后得到的图像。 c_i 由 c_{i-1} 半采样得到, d_i 由 d_{i-1} 半采样得到。AGAST-Difference的尺度金字塔如图2所示。

在尺度空间内进行AGAST检测后,为使特征点描述算子具有旋转不变的性能,首先通过小波扇形环绕^[8]赋予每一个特征点方向特征。然后经过非极大值抑制、剔除伪角点与亚像素级矫正等步骤后,便可得到校正的尺度信息及特征点坐标。

AGAST-Difference算子具有光照、旋转尺度不变性。本文算法仅在邻域计算DoG值,经过多次拟合和插值,能得到特征点精确的尺度空间位置与亚像素级的定位精度。其算法特点就是在图像较小变换时能够快速准确的配准。

本文算法采用FREAK描述符^[9]作为特征描述

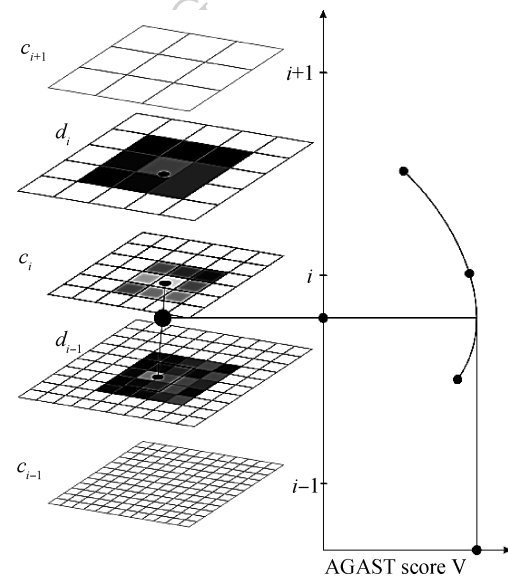


图2 AGAST-Difference 的尺度空间

Fig. 2 Scale space in AGAST-Difference

子。FREAK描述符是模仿人眼结构利用分区域获取信息的原理而设计的:采样点在以特征点为中心的同心圆上均匀分布。设特征点尺度为 S ,则同心圆半径为 $M_1S, M_2S, \dots, M_NS$, N 为采样点的层数。采样点离特征点越近越密集。每个采样点要进行与同心圆半径成正比的高斯平滑处理,相邻采样点具有重叠感受域,这样的设计会使交叠带被充分考虑,模板描绘更加准确。

低维度和高维度分别由FREAK描述符周边与中心的采样区域生成,因此周边采样区域与中央采样区域能够分别描述目标基本与细节信息。这与人类视网膜的成像机制完全一致,充分利用仿生学的FREAK描述子能够更加真实合理地对特征点进行描述,其对称圆形采样位置和采样半径随着尺度变化、强对比度二进制描述符与高斯模糊采样点等设计,使其具备旋转不变性、尺度不变性、光照不变性

与抗噪声影响性。因此 FREAK 描述子对于各种变换均具有较强的鲁棒性。

再经过扫视匹配^[9]与 PROSAC (progressive sample consensus)^[10]算法去除错误匹配点,便可得到两幅图像的最终几何变换关系。

3 匹配区域搜索方法

实验拟借鉴同一场景中的高分辨率航片进行低分辨率动态侦察视频的超分辨率重建,首要问题是找到航片与视频帧的对应关系,故提出匹配区域搜索方法:

首先解算该区域平均高程,由于无人机侦察时处于几百米或上千米的高空,若侦察区域为平原地区,航摄影像中的地物可近似认为处于同一平面,所以仅需求解地物的平均高程即可^[11]。

根据共线方程对图像的同名像点构成条件方程,即

$$\begin{cases} \frac{X_a - X_l}{Z_a - Z_l} = \frac{a'_1(x_a - x_1) + b'_1(y_a - y_1) - c'_1f_1}{a'_3(x_a - x_1) + b'_3(y_a - y_1) - c'_3f_1} \\ \frac{Y_a - Y_l}{Z_a - Z_l} = \frac{a'_2(x_a - x_1) + b'_2(y_a - y_1) - c'_2f_1}{a'_3(x_a - x_1) + b'_3(y_a - y_1) - c'_3f_1} \\ \frac{X_a - X'_l}{Z_a - Z'_l} = \frac{a''_1(x_b - x_1) + b''_1(y_b - y_1) - c''_1f_1}{a''_3(x_b - x_1) + b''_3(y_b - y_1) - c''_3f_1} \\ \frac{Y_a - Y'_l}{Z_a - Z'_l} = \frac{a''_2(x_b - x_1) + b''_2(y_b - y_1) - c''_2f_1}{a''_3(x_b - x_1) + b''_3(y_b - y_1) - c''_3f_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (X_a, Y_a, Z_a) 为待求得物点坐标, (x_a, y_a) 与 (x_b, y_b) 为两张航片中的同名点对, x_1 与 y_1 分别为照相机像主点偏离像原点的偏离值, f_1 为相机焦距, (X_l, Y_l, Z_l) 为摄影中心的地面坐标, 此时的 a'_i, b'_i, c'_i ($i=1,2,3$) 与 a''_i, b''_i, c''_i ($i=1,2,3$) 由 POS (position and orientation system) 的角元素: 俯仰角、翻滚角与航向角 (ϕ, ω, κ) 计算出来。

根据视频航片之间的实时匹配结果, 获取同名点对。为提高精度, 利用光束法区域网平差的误差方程, 对两张航片的 POS 数据和像点坐标观测值进行联合平差, 最后利用式 (1) 求解所有同名点的高程 Z_l 的平均值, 得到待定位区域平均高程 $\bar{Z}_l$ 。

利用平均高程 $\bar{Z}_l$ 与 POS 数据及云台转动参数推算视频帧 4 个角点的地面坐标, 设视频帧 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) , 可得

$$\begin{cases} \frac{X_1 - X_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_1(-w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_1f_2}{A_3(-w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_3f_2} \\ \frac{Y_1 - Y_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_2(-w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_2f_2}{A_3(-w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_3f_2} \\ \frac{X_2 - X_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_1(w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_1f_2}{A_3(w/2 - x_2) - B_3y_2 - C_3f_2} \\ \frac{Y_2 - Y_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_2(w/2 - x_2) - B_1y_2 - C_2f_2}{A_3(w/2 - x_2) - B_3y_2 - C_3f_2} \\ \frac{X_3 - X_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_1(w/2 - x_2) + B_1(h - y_2) - C_1f_2}{A_3(w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3f_2} \\ \frac{Y_3 - Y_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_2(w/2 - x_2) + B_2(h - y_2) - C_2f_2}{A_3(w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3f_2} \\ \frac{X_4 - X_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_1(-w/2 - x_2) + B_1(h - y_2) - C_1f_2}{A_3(-w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3f_2} \\ \frac{Y_4 - Y_v}{Z_l - Z_v} = \frac{A_2(-w/2 - x_2) + B_2(h - y_2) - C_2f_2}{A_3(-w/2 - x_2) + B_3(h - y_2) - C_3f_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, (X_v, Y_v, Z_v) 为摄影中心的地面坐标, w 和 h 为固定值, 分别表示图像的横、纵分辨率, x_2 与 y_2 分别为摄像机像主点偏离像原点的偏离值, f_2 为摄影焦距, 视频帧的 A_i, B_i, C_i ($i=1,2,3$) 由吊舱转动参数: 俯仰角、翻滚角与航向角 $(\phi, \varepsilon, \kappa)$ 计算出来。

此时视频帧或航片 4 个角点的地面坐标解算完毕, 但该坐标并不精确, 这是由于视准轴误差, 累积漂移误差、GPS 失锁和周跳以及由像片畸变、地球曲率、大气折光差等误差的存在, 所以无人机集成传感器定向法解算坐标精度并不高。在不进行地面控制测量时, 某型无人机利用集成传感器定向法定位精度为 150 m, 这无法满足找到视频帧与航片对应关系需求。为尽可能让定位区域足够小, 还要完全包含视频帧, 制定如下搜索策略:

如图 3 所示, 视频帧 4 个角点地面坐标分别为

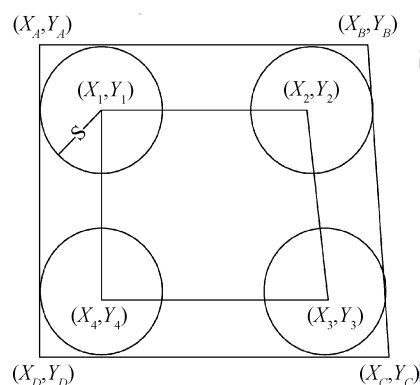


图 3 匹配区域示意图

Fig. 3 The schematic diagram of match area

$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$, 设该型无人机利用 ISO 定位误差距离为 S , 将 4 个点设为圆心, 画出 4 个半径为 S 的圆, 连接圆外部切线交于 4 点, 求出 4 点坐标 $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B), (X_C, Y_C), (X_D, Y_D)$, 即

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

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

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

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

至此, 视频帧 4 个角点地面坐标已解出, 按照此法解出航片 4 个角点地面坐标后, 便可找到航片与视频帧的对应关系。

然后采用基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法进行航片与视频帧之间的配准, 找到转移矩阵。同时将航片进行小波包频带分解, 从中提取高频细节信息, 再利用双线性插值方法放大视频帧, 将高频细节信息按转移矩阵补充到视频帧中。由于小波包分解能够对图像高频细节进行更加精细的分解, 且整个分解过程既无遗漏、无冗余, 以及视频帧与航片之间具有相似的场景, 使得提取的高频细节能与待复原的低分辨率图像在频率上连续性较好。

4 凸集投影优化迭代

为进一步提高重建保真度, 利用凸集投影算法优化调整处理后的低分辨率视频。凸集投影算法是在矢量空间内定义一些闭合的图形约束集合, 初始估计向这些约束集合进行投影, 则其交集为估计的高分辨率图像^[12], 即

$$G^l(i, j) = \{z^{(k)}(r, s) : |r^l(i, j)| \leq \delta^l(i, j)\} \quad (7)$$

$$r^{(l)}(i, j) = y^{(l)}(i, j) - \sum z^{(k)}(r, s) A^{(l, k)}(r, s; i, j) \quad (8)$$

$$l = k - \frac{M-1}{2}, \dots, k, k + \frac{M-1}{2}, \forall (i, j) \in \theta^{(l)} \quad (9)$$

$$P(i, j)[x^{(k)}(r, s)] = x^{(k)}(r, s) + \begin{cases} \frac{(r^l(i, j) - \delta^l(i, j)) A^{(l, k)}(r, s; i, j)}{\sum_{\sigma_1} \sum_{\sigma_2} A^{(l, k)^2}(o_1, o_2; i, j)} & r^l(i, j) > \delta^l(i, j) \\ 0 & -\delta^l(i, j) \leq r^l(i, j) \leq \delta^l(i, j) \\ \frac{(r^l(i, j) + \delta^l(i, j)) A^{(l, k)}(r, s; i, j)}{\sum_{\sigma_1} \sum_{\sigma_2} A^{(l, k)^2}(o_1, o_2; i, j)} & r^l(i, j) < -\delta^l(i, j) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\theta^{(l)}$ 表示第 l 幅观测图像的支撑域; $\delta^l(i, j)$ 为模型的统计不确定性, 通常由空域时域可噪声过程的标准偏差来确定; $y^l(i, j)$ 表示第 l 幅观测图像上的像素点; $z^{(k)}(r, s)$ 表示第 k 幅高分辨率图像上的像素点; $A^{(l, k)}(r, s; i, j)$ 为从第 k 幅高分辨率图像到第 l 幅低分辨率图像的降质模型; $r^l(i, j)$ 为高分辨率图像 $z^{(k)}(r, s)$ 经降质模型后的结果与实际观测低分辨率图像之间的偏差, $P(i, j)$ 为一致性投影算子, $G^l(i, j)$ 为凸集约束集合^[13]。

根据 $A^{(l,k)}(r,s;i,j)$ 把 $z^{(k)}(r,s)$ 与 $y^l(i,j)$ 联系起来形成残余项 $r_i^l(i,j)$, 如果残余项超出初始设定阈值, 则投影算子 $P^l(i,j)$ 把残余项反投影到当前高分辨率估计图像上, 这样就形成了属于 $G^l(i,j)$ 的新的高分辨率估计图像, 迭代直到连续两次估计之间的变化落到初始阈值以下停止。

5 仿真实验分析

5.1 AGAST-Difference 检测子的性能

为验证尺度空间构建、检测算法不同所产生的

效果, 同时保证实验的客观性, 本文处理了标准测试图集里的 leuven1 图像, 以准确连续测定近年来比较热门且极有特点的检测子的重复率^[14]: SIFT (scale invariant feature transform)^[15]、SURF (speeded up robust features)^[16] 以及本文 AGAST-Difference 检测子的旋转、光照、尺度、噪声和视点变换性能, 结果如图 4 所示。

由于 AGAST-Difference 算子中采用了 AGAST 检测法, 所以视点变换鲁棒性及处理速度要强于 SURF 采用的近似计算的 Fast-Hessian, 而 SIFT 采用的 DoG 在 3 种检测子中鲁棒性最高, 但计算复杂, 实时性差。

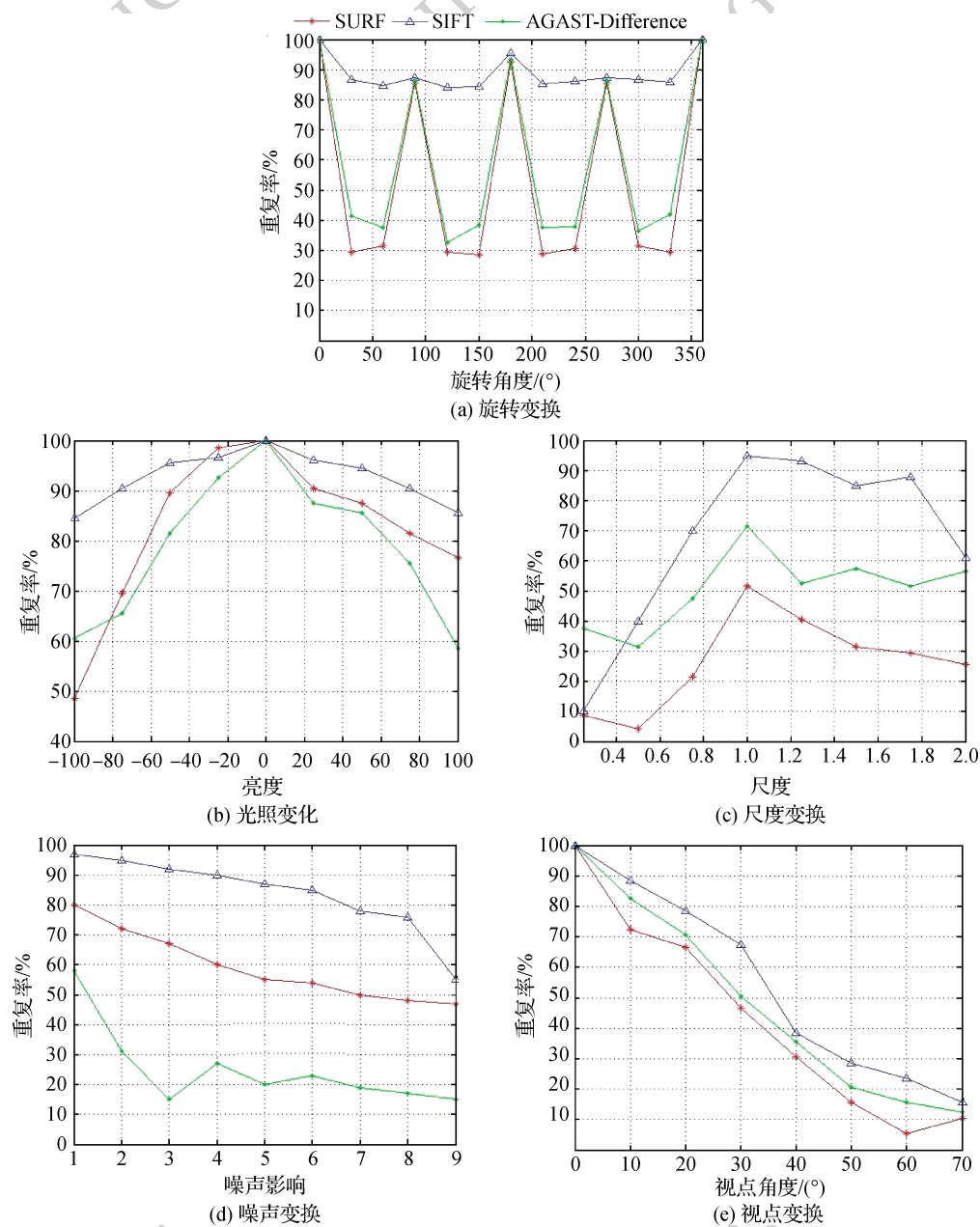


图 4 不同变换条件下的重复率比较

Fig. 4 Repeatability comparison under different transformations ((a) rotation change; (b) brightness change; (c) scale change; (d) noise change; (e) viewpoint change)

为了保证算法的实时性, AGAST-Difference 算子的定向法为灰度质心法, 所以旋转鲁棒性略强于 SURF, 弱于 SIFT。

由于 AGAST-Difference 算子尺度空间的构建综合考虑了实时性与准确性, 所以尺度变换鲁棒性高于使用模板滤波与图像卷积的 SURF, 而 SIFT 尺度变换鲁棒性最为准确, 但尺度空间计算复杂, 实时性差。为保证算法的实时性而没有进行高斯滤波, 所以 AGAST-Difference 算法对噪声与亮度较为敏感。

综上所述, AGAST-Difference 检测子的各种变换综合鲁棒性高于 SURF, 稍弱于 SIFT, 但 AGAST-Difference 算子的实时性最好, 有关本检测子的速度优势将在下一节阐述。

关于 FREAK 描述子的性能优势, 文献[9]做了详细的测试, 无论在光照、尺度、旋转、噪声等变换以及运动模糊下, 均具有比 SIFT 与 SURF 描述子更强的鲁棒性, 这极有利于图像配准。

5.2 基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配时间测试

利用 Graf 图像序列中的第 1 幅与第 3 幅图像 (图像大小为 800 × 640 像素) 进行了实验, 同时对 SURF、SIFT 与 AGAST-Difference 算法进行了对比, 分析了本文算法的特点与优势, 为工程实践提供了指导帮助。计算机配置: 处理器为 Intel 酷睿双核 i7 第四代, 主频为 2.5 GHz。操作系统为 Win10 64 位系统, 编程环境为 visual studio 2010 与 OPENCV 3.0。

表 1 清楚地展现了本文算法的速度优势, 检测子的执行速度约为 SURF 的 13 倍, 大大领先于 SIFT, 这是因为本文算法去除了高斯滤波, 重新构建了尺度空间, 引入 AGAST 加速了特征点的检测。描述子方面, FREAK 的执行速度超于 SURF 与 SIFT, 且性能略高于 SIFT。且经上文描述子测试与文献[8]检测子测试, 本文算法在各种变换的鲁棒性较高, 所以对于大分辨率的无人机遥感影像匹配大有裨益。

表 1 算法耗时比较

Table 1 Comparison of time consumption for different methods

算法	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	1 557	107.9	559.1	667.0	0.428
SIFT	1 952	1 723	917.1	2 640.1	1.352
本文	1 051	17.20	17.08	34.28	0.032

5.3 匹配区域搜索方法实现

利用六旋翼无人机作为实验平台对河北省石家庄市行唐县地区进行了实验。实验主要技术参数见表 2。计算机配置: 处理器采用 Intel 酷睿双核 i7 第四代, 主频为 2.5 GHz, 内存为 8 GB, 操作系统为 Win8 64 位系统, Matlab R2012 与 VC++2008 OPENCV 编程环境。取 75 幅视频帧、55 幅航片与相关 POS 数据, 前 2 幅数据见表 3。

表 2 实验影像技术参数

Table 2 Aerial photography and survey specifications

参数	
航摄时间	2015 年 8 月
航摄飞机	大疆 S800 六旋翼无人机
航摄仪	SONY NEX7、Zemuse 云台系统
航摄仪定焦/mm	24
视频分辨率/像素	810 × 612
摄像比例尺	1:1 500
航片分辨率/像素	5 344 × 4 032
照像比例尺	1:1 500
航向重叠/%	70
旁向重叠/%	60
航线/条	4
像片/张	55
区域范围/km	3
最大地形起伏/m	373
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 实验视频帧与航片的 POS 数据

Table 3 The POS data of the test video frames and aerial images

影像	X/m	Y/m	Z/m	$\varphi/(^{\circ})$	$\omega/(^{\circ})$	$\kappa/(^{\circ})$
1	114.516	38.576	358.734	3.2	4.5	87.2
2	114.437	38.437	362.523	3.3	4.7	92.1

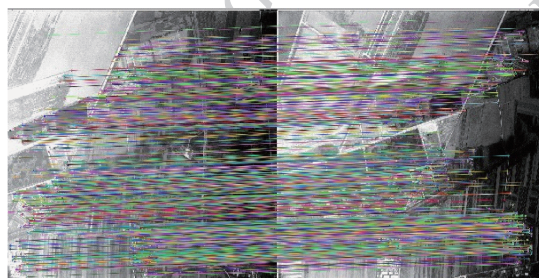
利用基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法将两张航片匹配, 进而获取同名点, 结果如图 5(a)。利用 POS 数据与同名点对确定同名点平均高程, 再利用平均高程与目标帧外方位元素, 通过式(2)计算目标帧地面坐标系的 4 个角点 2 维坐标 $A_1 \sim A_4$, 将无人机集成传感器定位误差距离按比例尺转换, 作为误差半径, 通过式(3)~(6)计算出匹

配区域 4 个角点坐标 $B_1 \sim B_4$, 结果如表 4 所示。按此法计算每幅航片 4 个角点坐标后, 从对应航片中提取该区域 (结果如图 5(b)), 对视频帧进行高频补偿 (结果如图 5(c)), 取不同视频帧与航片实验 100 次, 平均用时 2.73 s。

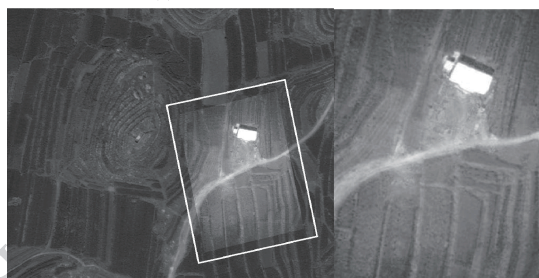
表 4 角点坐标值

Table 4 The coordinate values of the corner

角点编号	X/m	Y/m
A_1	114.515 61	38.577 32
A_2	114.517 27	38.577 12
A_3	114.516 70	38.575 35
A_4	114.515 22	38.575 61
B_1	114.515 56	38.577 39
B_2	114.517 16	38.577 14
B_3	114.516 83	38.575 22
B_4	114.515 12	38.575 59



(a) 视频帧配准获取同名点



(b) 提取匹配区域

(c) 高频补偿

图 5 区域确定结果

Fig. 5 The results of region confirming ((a) video frames mosaic to obtain homonymy points; (b) extraction matching region; (c) high frequency compensation)

5.4 超分辨率重建测试

使用峰值信噪比 (PSNR) 和均方误差 (MSE)^[17] 两种方法对重建的图像质量进行了评价。

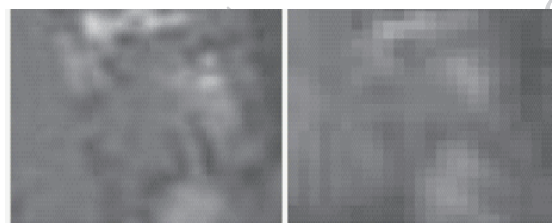
$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255 \times 255}{\sum (f_{i,j} - f'_{i,j})^2 / N_1 \times N_2} \quad (11)$$

$$\text{MSE} = \sum (f_{i,j} - f'_{i,j})^2 \quad (12)$$

式中, N_1 为图像水平方向像素数, N_2 为图像垂直方向的像素数; $f_{i,j}$ 和 $f'_{i,j}$ 分别表示 (i, j) 位置处理前高分辨率图像和处理后图像的灰度值。

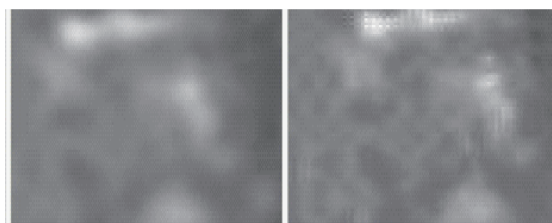
把 75 帧理想高分辨率视频 (每帧 810×612 像素), 经高斯模糊和降采样等方法生成 75 帧低分辨率视频 (每帧 405×306 像素), 分别采用双线性插值法、文献[3]算法和本文算法对低分辨率视频序列进行超分辨率重建。其中文献[3]算法与本文算法利用与目标帧图像邻近的 75 帧图像进行超分辨率, 以第 32 帧为目标帧, 利用其他各帧对其进行复原。

如图 6 所示, 与其他 2 种算法相比, 本文算法的复原图像质量有显著提高。从表 5 比较的结果来看, 本文算法重建图像与原始图像的误差率较低、速度更快。这是由于采用匹配区域搜索方法与基于 AGAST-Difference 与 FREAK 的特征匹配算法, 使得视频帧与航片之间匹配准确, 同时小波包的精细分解, 使得提取的高频细节能与待复原的低分辨率图像在频率上连续性较好。由于连续性较好的高频细节增加, 改善了原始视频帧图像质量, 同时凸集投影迭代优化保证了收敛的稳定性与重建图像细节, 所以重建后的视频帧边缘保持较好。



(a) 高分辨率参考图像细节

(b) 双线性插值图像细节



(c) 文献[3]算法重建图像细节 (d) 本文算法重建图像细节

图 6 无人机录像第 1 帧重建结果对比细节

Fig. 6 The details of restoration result comparison of the first frame of UAV video ((a) the details of high-resolution reference image; (b) the details of bilinear interpolation image; (c) the details of image in reference [3]; (d) the details of image in this article)

表5 重建质量评价表

Table 5 Reconstruction quality assessment data

算法	MSE	PSNR/dB	时间/s
双线性插值	186.07	22.43	<0.05
文献[3]	151.03	26.22	25.41
本文	63.65	30.13	5.58

图7所示是针对Coastguard序列,迭代优化次数对重建效果的测试仿真。两种算法均随迭代次数的增加,重建效果越优良。本文算法约为20次时重建效果达到最优,而文献[3]算法则为78次。且本文算法最优效果高于文献[3]算法约为5 dB。这是由于凸集投影相对于最大后验概率约束优化所需迭代次数更少,且收敛的稳定性,这便减少了计算复杂度,提高了算法整体收敛速度。

图8所示是Coastguard序列的逐帧测试结果。本文算法重建质量高于双线性插值与文献[3]算法,平均水平提高约4 dB。但与目标帧间距离越远,重建质量越低。因为距离变远,待处理帧无法在目标帧获得有用数据,同时图像配准误差叠加,造成该部分图像的重建质量差。

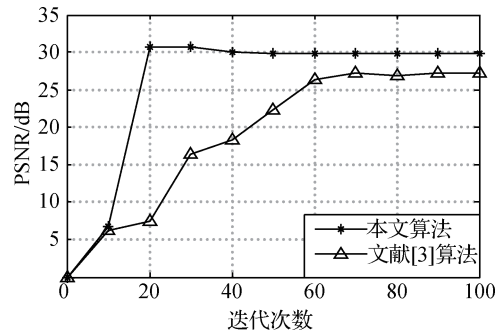


图7 迭代次数影响效果

Fig. 7 The influence results of the number of iterations

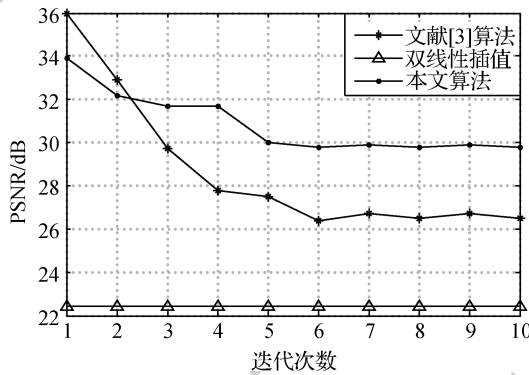


图8 序列逐帧测试结果

Fig. 8 Results of all frames of several sequences

6 结论

提出一种无人机侦察视频超分辨率重建方法,首先采用基于AGAST-Difference与FREAK的特征匹配算法对视频目标帧与相邻帧之间配准,然后根据匹配区域搜索方法找到目标帧与航片的对应关系,利用包含目标帧地物的航片对视频帧进行高频补偿,最后采用凸集投影方法对补偿后视频帧进行迭代优化,通过仿真以及实验充分说明了本文方法的可行性与优越性。本文做了以下工作:

1) 说明了目前无人机侦察视频提高分辨率问题的必要性,同时分析了问题的核心所在,理清了无人机侦察视频超分辨率重建的研究思路。

2) 根据存在的实际问题,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详尽的理论分析与实验验证,通过与当前使用广泛的SIFT、SURF算子对比,定量表现了该算法在解决匹配,特别是尺度、旋转、视角变化较大及运行速度等问题上存在很大优势。

3) 利用无人机视频设备能够同时提供动态视频和静止图像拍摄的特点,提出了匹配区域搜索方法将获取的高分辨率图像有效高频信息用于相应视频序列的重建,保证了重建图像的高频细节;再者引入凸集投影约束优化过程,强化了重建图像的一致性与保真度,从各个角度均优于最大后验概率方法,特别是对图像边缘细节部分等效果极为明显。

4) 通过六旋翼无人机作为实验平台对河北省石家庄市行唐县地区进行了实验,分析了本文算法的特点与优势,为工程实践提供了指导帮助。

本文方法还存在不足:图像预处理层面还有很大改良空间;本文方法在计算机实现方面还有很大的改良前景。该方法虽然简单实用,但精度有待提高,下一步可以从特征配准与迭代优化两方面进行改良。

参考文献 (References)

[1] Fan C, Sun N N, Xia X. Super-resolution reconstruction based on image sequences [J]. Infrared Technology, 2010, 32(5): 279-282. [樊超, 孙宁宁, 夏旭. 基于序列图像的超分辨率

- 重建[J]. 红外技术, 2010, 32(5): 279-282. [DOI: 10.3969/j. issn. 1001-8891. 2010. 05. 007]
- [2] Pham T Q, van Vliet L J, Schutte K. Resolution enhancement of low-quality videos using a high-resolution frame [C] // Proceedings of the SPIE 6077, Visual Communications and Image Processing 2006. San Jose, CA, USA: SPIE, 2006, 6077: #607708. [DOI: 10.1117/12.643489]
- [3] Wang S Y, Zhuo L, Shen L S, et al. A simple & effective video sequence super-resolution algorithm [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 742-747. [王素玉, 卓力, 沈兰荪, 等. 一种简单有效的视频序列超分辨率复原算法 [J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 742-747.]
- [4] Wang S Y, Zhuo L, Shen L S, et al. A least square affine-based block-match image registration algorithm for dynamic video super resolution [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(3): 542-545. [王素玉, 卓力, 沈兰荪, 等. 一种用于动态视频超分辨率的多尺度最小二乘仿射块匹配图像配准方法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 542-545.]
- [5] Zhang Y, Li J Z, Li D L, et al. Research of remote sensing image matching based on key points [J]. Radio Engineering, 2016, 46(2): 61-64. [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.]
- [6] Mair E, Hager G D, Burschka D, et al. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test [C] // Proceedings of 11th European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 183-196. [DOI: 10.1007/978-3-642-15552-9_14]
- [7] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [C] // Proceedings of 9th European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg: Springer, 2006: 430-443. [DOI: 10.1007/11744023_34]
- [8] Rublee E, Rabaud V, Konolige K et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C] // Proceedings of International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spanish: IEEE, 2011: 2564-2571. [DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544]
- [9] Alahi A, Ortiz R, Vandergheynst P. FREAK: fast retina key-point [C] // Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI, USA: IEEE, 2012: 510-517. [DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247715]
- [10] Shang M S. Image registration method based on improved speed-up robust features [J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(2): 125-128. [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.]
- [11] Zhang Y, Li J Z, Li D L, et al. Research on UAV targeting based on POS and image matching [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2015, 27(1): 39-45. [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.] [DOI: 10.3969/j. issn. 1008-2956. 2015. 01. 010]
- [12] Patti A J, Sezan M I, Tekalp A M. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1064-1076. [DOI: 10.1109/83.605404]
- [13] Zhang Y, Li J Z, Du Y L, et al. An improved method for video super-resolution reconstruction [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(9): 3138-3140. [张岩, 李建增, 杜玉龙, 等. 一种改进的视频超分辨率重建方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9): 3138-3140.] [DOI: 10.16526/j. cnki. 11-4762/tp. 2015. 09. 061]
- [14] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630. [DOI: 10.1109/TPAMI.2005.188]
- [15] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110. [DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94]
- [16] Shen L S, Zhuo L. Wavelet Coding and Network Video Transmission [M]. Beijing: Science Press, 2005. [沈兰荪, 卓力. 小波编码与网络视频传输 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.]