

引用格式:葛林,于鸣,任洪娥.基于快速尺度空间的无人机影像自适应稳像方法[J].电光与控制,2019,26(2):32-37. GE L, YU M, REN H E. Adaptive stabilization of UAV image based on fast scale space[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2):32-37.

基于快速尺度空间的无人机影像自适应稳像方法

葛林¹, 于鸣^{1,2}, 任洪娥^{1,2}

(1. 东北林业大学信息与计算机学院, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省林业智能装备工程研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要:为实现无人机航拍影像的实时稳像,针对稳像过程中特征检测的速度问题和运动滤波的发散现象,提出了一种改进的AGAST算法与自适应Kalman滤波相结合的实时稳像算法。对于无人机实时航拍视频序列,以当前帧的前一帧为基准进行稳像处理。改进的AGAST特征检测算法在尺度空间的基础上快速提取AGAST角点特征,用二进制描述符对其进行描述,然后用汉明距离匹配特征点。对于已获得的匹配特征点对集合,用RANSAC原则剔除误匹配点,再计算运动矢量。最后使用自适应Kalman滤波提取出运动矢量中的无人机主动扫描分量,进行运动补偿,获得稳像结果。实验数据使用标准测试图集和自己采集的无人机航拍视频,实验结果表明,所提算法在连续视频序列处理时效果显著、速度快,能够满足实时稳像的需求。

关键词:无人机航拍视频; AGAST; 决策树; 尺度空间; 运动滤波; Kalman滤波

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.007

Adaptive Stabilization of UAV Image Based on Fast Scale Space

GE Lin¹, YU Ming^{1,2}, REN Hong-e^{1,2}

(1. College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Heilongjiang Forestry Intelligent Equipment Engineering Research Center, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to realize the real-time image stabilization of the UAV aerial image and solve the problem of slow speed in feature detection and the divergence in motion filtering during the process of image stabilization, a real-time image stabilization algorithm is proposed combining the improved AGAST (Adaptive and Generic corner detection based on the Accelerated Segment Test) algorithm with the adaptive Kalman filter. For the real-time aerial video sequences, the image stabilization processing is based on the frame prior to the current frame. The improved AGAST feature detection algorithm rapidly extracts the features of AGAST corners on the basis of scale space, which are described by binary descriptors, and then the feature points are matched by using Hamming distance. For the matched sets of point pairs, the RANSAC principle is used to eliminate the mismatched points and then the motion vector is calculated. Finally, the adaptive Kalman filter is used to extract the active scanning component of the UAV in the motion vector, which performs motion compensation to obtain the result of image stabilization. The standard test atlases and the UAV aerial video collected by researchers serve as the experimental data. The experimental results show that the proposed algorithm is effective and fast in the processing of the continuous video sequence, and can meet the needs of real-time image stabilization.

Key words: UAV aerial video; AGAST; decision tree; scale space; motion filtering; Kalman filtering

0 引言

无人机作为一种新型数据采集工具在各个领域的

应用越来越广泛,受到很多研究人员的青睐。无人机可以从不同视角对目标进行实时监控,为技术人员提供全景、详实的监控画面,但其在飞行过程中可能受机体本身或者环境影响存在机身抖动和随机晃动,造成航拍视频的抖动和不稳定现象。这严重影响航拍视频的效果,导致其失去价值。很多无人机影像具有时效性,实时快速的稳像技术可以给研究人员提供宝贵的

收稿日期:2018-01-26

修回日期:2018-03-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2572017PZ10)

作者简介:葛林(1994—),男,山东日照人,硕士生,研究方向为图像处理与智能控制。

数据。

特征提取和匹配的速度基本上决定了稳像的时间,所以快速的特征提取算法可以有效降低时间复杂度^[1]。LOWE 提出的 SIFT 算法是图像匹配的经典算法,精准度高,但速度慢^[2]。之后 BAY 提出的 SURF 算法对 SIFT 算法的过程做了优化,但复杂的特征描述方式维度较高导致匹配时间长^[3]。Harris 算法和 FAST 算法速度快,但不具有尺度不变性,无法满足处理高空航拍图像的要求^[4]。在稳像时,传统的运动补偿方式可以解决相邻帧间的图像突变问题^[5],但不具有自适应性,容易造成滤波发散现象,严重影响视频效果。

针对以上算法的不足,本文采用了基于尺度空间的改进 AGAST 算法,结合二进制特征描述符进行帧间匹配,可以极大地缩短运行时间,然后用 RANSAC 准则剔除误匹配点,消除前景运动物体的影响,估算出运动矢量,最后通过自适应 Kalman 滤波进行运动补偿,输出稳定的视频序列。

1 基于改进 AGAST 的特征匹配算法

1.1 改进的 AGAST 特征检测算法

在速度方面,AGAST 算法相比于其他特征检测算法优势明显^[6]。AGAST 特征提取算法是在 FAST 算法的基础上经改进而得到,其检测速度更快,在复杂背景下的检测效果也更好。无人机在飞行过程中会做垂直方向的移动,在特征匹配时有一定的尺度要求^[7]。但由于 AGAST 算法本身不具有尺度不变性,因此本文将高斯尺度金字塔与 AGAST 算法相结合,保证稳像在尺度空间下的效果。

首先建立尺度空间,根据 LOWE 提出的尺度变换理论,LoG 算子是实现尺度变换的唯一线性算子

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

所以,一幅二维图像在尺度空间下的定义是

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

式中: $L(x, y, \sigma)$ 是在尺度空间下的图像, σ 是尺度系数; $I(x, y)$ 是原图像。

构造 n 层内层平面 C_i 和 n 层外层平面 d_i ,两种层面交错排列构成尺度金字塔。其中, C_0 是原图像, C_i 是 C_{i-1} 的 2 倍采样, d_0 是原图的 1.5 倍采样, d_i 是 d_{i-1} 的 2 倍采样。

在每一层用 AGAST 算法检测特征,利用 AGAST 检测模板遍历邻域圆周上的 16 个像素点的灰度值,将其输入到 AGAST 决策树中筛选特征点,如图 1、图 2 所示。

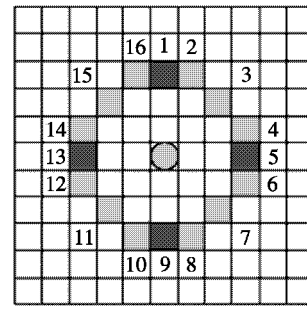


图1 AGAST 检测模板

Fig. 1 AGAST detection template

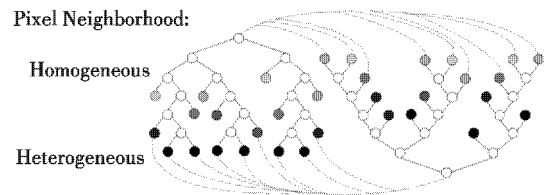


图2 AGAST 决策树

Fig. 2 AGAST decision tree

为了提高查找特征点的效率,采用一种预处理方法排除一部分非角点像素。该方法仅检查像素点 p 周围位置 1,5,9 和 13 这 4 个位置的像素,如果 4 个像素点都在阈值 t 范围内,那么说明超过四分之三圆的部分满足判断条件,则像素点 p 可能为关键点;否则 p 不是关键点,继续检查下一个像素点。对于阈值 t 的选取,采用自适应的取值方法,即

$$t = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n I_{j_{\max}} - \sum_{j=1}^n I_{j_{\min}} \right) * a \quad (3)$$

式中: n 是图像中像素灰度最大值和最小值的数量; $I_{j_{\max}}$ 和 $I_{j_{\min}}$ ($j=1,2,3,\dots,n$) 分别表示最大的前 n 个值中在位置 j 处的像素灰度值和最小的后 n 个值中排在位置 j 处的像素灰度值; a 表示比例系数,一般取 0.10 ~ 0.25,本文 a 取值 0.15。检测出特征点后,记录特征点的位置信息和尺度信息。

本文使用的建立尺度空间结合 AGAST 特征检测的方式,相比于传统的用高斯卷积函数建立差分金字塔的方法,减少了计算量,速度得到明显提升,尤其适用于实时处理。

1.2 二进制特征描述符

无人机航拍影像视角广,信息量大,传统的特征描述处理方式复杂,处理速度慢,显然不适合快速实时稳像。本文使用的 FREAK 特征描述算子用二进制编码,用一串二进制数表示,对比 SIFT 和 SURF 的描述符,速度快也易于特征匹配。

FREAK 算法使用接近于人眼视网膜的采样模式^[8],见图 3。FREAK 采样模式中共有 43 个采样点,从外到

内采样点个数依次为6,6,6,6,6,6,6,1,中间的1个是特征点。

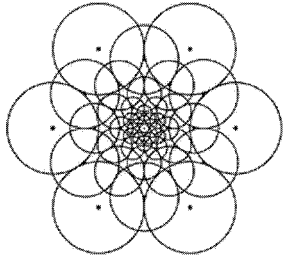


图3 FREAK 采样模式

Fig. 3 FREAK sampling mode

由于随机点对的形式受噪声影响很大,需要先对图像进行高斯平滑,然后按照采样模式在每一个局部区域采样随机点对,共有903个采样点对。每一个点对对应一个二进制位,定义如下

$$\tau(P_i) = \begin{cases} 1 & I(P_i^1) < I(P_i^2) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_i 表示一个采样点对, $I(P_i^1)$ 和 $I(P_i^2)$ 是这两个采样点的灰度值。随机选择 N 个点对就可以生成一串二进制数,生成的特征描述符可以表示为

$$F = \sum_{0 \leq i < N} 2^i \tau(P_i) \quad (5)$$

由于采样点混叠,采样点对具有很高的相关性,需要对特征描述符进行降维。建立矩阵 D , D 的行数是特征点的个数,列数是采样点对数。计算每一列的均值,均值接近0.5的列靠前,对每一列重新排序,选取前512列,即为特征描述符的长度512 bit。

为每个特征点添加方向信息以保证算法的旋转不变性,每一个特征点的主方向是

$$O = \frac{1}{K} \sum_{P_o \in G} (I(P_o^1) - I(P_o^2)) \frac{P_o^1 - P_o^2}{\|P_o^1 - P_o^2\|^2} \quad (6)$$

式中: K 是采样点对的个数; P_o 是局部区域中心的二维向量。特征匹配使用的是汉明距离^[9]。

2 自适应运动补偿

2.1 运动估计

获得相邻两帧图像的匹配点对后,采用4维参数的仿射变换模型计算变换参数

$$\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -b & t_x \\ b & a & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{n-1} \\ Y_{n-1} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: a 和 b 分别表示图像的缩放和旋转分量; t_x 和 t_y 表示图像的平移分量。这个算式特征点越多,计算量越大,因此必须合理控制特征点的个数,保证计算的速度和准确性^[10]。最后用最小二乘法求出运动矢量。

针对无人机航拍的场景中可能出现运动物体,采

用RANSAC原则剔除运动物体的干扰,可以有效减少错误匹配点的个数,提升处理速度,同时提高变换矩阵的精度。RANSAC原则在尽可能少的情况下通过抽取足够多的数据确定模型参数,将得到的数据分为内点和外点,再去除无效的^[11-12]。

假设全体数据是内点的概率为 e ,从原匹配点集合中随机抽取 k 对,则这组数据全为内点的概率是 e^k 。计算得到图像变换矩阵,然后在剩余点集合中找到符合这个矩阵的其他点,不断地将这些点添加到内点中。利用容限误差将其余匹配点对分为内点和外点,从而剔除外点,剩余的点集合即为所需要的精确匹配点。

2.2 自适应的Kalman滤波

对运动矢量进行分离,可得出主动运动分量和抖动分量。由于抖动分量是高频量,主动运动分量是低频量,所以可以用滤波的方式将抖动分量滤除。Kalman滤波是基于运动的连续性提出的,能从一系列测量数据中估计动态系统的状态^[13]。

Kalman滤波利用上一时刻的预测值和当前状态的观测值来确定当前状态的估计值,不需要历史记录信息,是高效率的递归滤波器,尤其适用于实时处理。但在实际应用中得到的状态估计可能有偏差,而且误差的累积会导致滤波的发散现象。当发生发散现象时,滤波器就完全失去了作用^[14],所以在实际应用中必须抑制发散。本文使用了自适应的Kalman滤波进行运动补偿,通过时变噪声统计估计器,实时估计和修正噪声方差矩阵,将旋转对滤波的影响降到最小,生成稳定的视频序列。

假设当前时刻是 k ,针对独立的运动分量构造随机线性离散系统

$$S(k) = F * S(k-1) + w \quad (8)$$

$$Z(k) = H * S(k) + v \quad (9)$$

式中: $S(k)$ 是系统的状态矢量; $Z(k)$ 是观测矢量; F 是状态转移矩阵; H 是观测矩阵; w 是过程激励噪声序列; v 是观测噪声序列。根据系统的上一状态和系统的过程模型预测当前状态及其预测方差矩阵

$$S(k|k-1) = F * S(k-1) \quad (10)$$

$$P(k|k-1) = F * P(k-1) * F^T + Q \quad (11)$$

然后结合预测值和测量值,得到当前状态的最优估计值

$$\begin{cases} S(k|k) = S(k|k-1) + K(k) * \epsilon(k) \\ \epsilon(k) = Z(k) - H * S(k|k-1) \\ K(k) = P(k|k-1) * H^T * [H * P(k|k-1) * H^T + R]^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\epsilon(k)$ 是新息序列; $K(k)$ 是Kalman增益。在当前时刻下的误差方差矩阵为

$$P(k|k-1) = [I - K(k) * H] * P(k|k-1) \quad (13)$$

式中, I 是单位矩阵。

传统的 Kalman 滤波不能在过程噪声协方差 Q 和观测噪声协方差 R 都未知的情况下把二者估计出来, 通常采用的是固定值, 这样会导致滤波发散现象^[15], 致使估计值与预测值相差很大。通过加权系数 $W(k)$ 对 $P(k|k-1)$ 进行修正, 自适应地调节预测方差。将状态预测协方差矩阵表示为

$$P(k|k-1) = W(k) * F * P(k-1) * F^T + \hat{Q}(k) \quad (14)$$

滤波器是否发散可以通过新息序列 $\varepsilon(k)$ 来判断

$$\varepsilon(k)^T * \varepsilon(k) \leq \text{tr}(H * P(k|k-1) * H^T + \hat{R}(k)) \quad (15)$$

过程噪声协方差 Q 和观测噪声协方差 R 的估计方程为

$$\begin{aligned} \hat{R}(k) &= (1 - d(k)) * R(k-1) + \\ d(k) * (\varepsilon(k) * \varepsilon(k)^T - H * P(k) * H^T) \quad (16) \end{aligned}$$

$$\hat{Q}(k) = (1 - d(k)) * Q(k-1) +$$

$$d(k) * (K(k) * \varepsilon(k)^T * K(k)^T + P(k) - F * P(k-1) * F^T) \quad (17)$$

当滤波器状态满足式(15)的条件时, 滤波器处于正常状态; 否则, 滤波器已发散, 则通过加权系数 $W(k)$ 对 $P(k|k-1)$ 进行修正。由式(13), 式(16), 式(17)可以得到

$$W(k) = \frac{\varepsilon(k)^T * \varepsilon(k) - \text{tr}(H * Q(k) * H^T + R(k))}{\text{tr}(H * F * P(k) * F^T * H^T)} \quad (18)$$

通过条件判断滤波器是否正常工作, 自适应调节加权系数, 可以有效避免滤波器的发散现象。这种方法计算简便, 适应性强。

3 实验分析

3.1 实验设备

本实验在 Windows 平台下进行, 计算机配置: 处理器是 Inter® Core™ i7-6700, 主频 3.4 GHz, 显卡 AMD Radeon™ R7 350, 内存 6 GiB, 系统为 Windows7。使用 OpenCV2.4.13 库的 API 在 Microsoft Visual Studio 2017 上运行编写的程序。

采集数据使用的无人机是 DJI INSPRIE 2 专业级四轴飞行器, 最大飞行速度 108 km/h, 最大飞行时间 27 min, 最大起飞海拔高度 2500 m, 镜头可控俯仰角 $-130^\circ \sim +40^\circ$, 镜头转速 $90^\circ/\text{s}$ 。采集到的无人机影像分辨率为 1000×750 , 帧速 30 帧/s, 拍摄时间是 2016 年 10 月 11 日。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 特征匹配效果分析

使用牛津大学图像库 (<http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/data/>) 标准测试图集 Affine Covariant Regions Datasets 中的 Graffiti 图组。Graffiti 图组是一组视点变换

图片, 从不同角度拍摄同一景物, 图片大小为 800×640 。该图组可以有效检测算法的尺度不变性、旋转不变性和鲁棒性。用本文提出的改进 AGAST 特征匹配算法处理 Graffiti_img01 和 Graffiti_img02 后结果如图 4 所示。



a 原图像 Graffiti_img01 b 原图像 Graffiti_img02

c 匹配结果

图 4 测试图像和处理结果

Fig.4 Test images and processing result

由以上结果可以看出, 本文算法具有较强的尺度不变性和旋转不变性, 检测到的特征点不多, 但在位置和尺度上很精准, 使得特征匹配更加准确。

3.2.2 特征匹配性能分析

特征提取和匹配在实时稳像处理中极为重要, 针对本文提出的改进 AGAST 特征匹配方法, 以采集到的 5 帧无人机影像为基准, 对第 7 帧进行处理, 视频分辨率 1000×750 , 实验次数 100, 实验结果取均值。对比 SIFT 算法、SURF 算法、BRISK 算法和 ORB 算法, 结果如表 1 所示, 本文算法的实验结果如图 5 所示。

表 1 算法耗时比较

Table 1 Time consuming comparison

算法	特征点个数	检测耗时/ ms	描述耗时/ ms	匹配耗时/ ms	匹配准确率/%
SIFT 算法	5140	690.43	913.22	595.21	75.21
SURF 算法	2780	139.52	264.39	330.67	81.45
BRISK 算法	1435	96.10	47.21	56.18	85.06
ORB 算法	927	51.62	33.77	16.02	79.26
本文算法	396	22.01	14.28	10.74	88.43

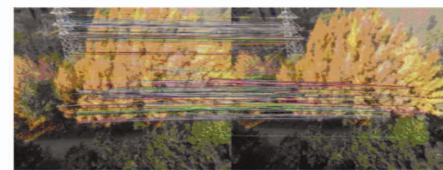


图 5 本文算法处理结果

Fig.5 Results of our algorithm

根据实验结果和算法效率对比可以明显看出本文算法的速度优势。考虑到运动矢量的估计, 对特征点的要求更为严格。结合尺度金字塔使得算法具有一定的尺度不变性, 改进的 AGAST 特征提取算法检测速度更快, 可以快速有效地排除非特征点, 其速度遥遥领先

于传统的 SIFT 算法和 SURF 算法,相比于 BRISK 算法和 ORB 算法也有一定优势。

特征描述使用二进制数简单方便,计算量小,并且极大简化了特征匹配过程。由于基准帧和匹配帧的间隔时间短,所以表格中的各个算法匹配准确率都比较高,但本文算法更适用于当前视频下的匹配处理,所以准确率更高。

实验证明,改进的 AGAST 特征检测算法和用二进制描述的特征匹配算法速度完全适用于实时处理,匹配的准确率也有一定保证。

3.2.3 稳像结果分析

使用本文提出的改进 AGAST 特征匹配算法,并结合自适应 Kalman 滤波方法,对采集到的无人机航拍视频进行处理。在拍摄视频时,为了检测算法性能,无人机包含平移运动、垂直运动和旋转运动。

对视频的稳像从第 2 帧开始,每次稳像都以当前帧的前一帧为基准图像进行稳像处理。对稳像的结果截取多帧图像展示,与原图像和传统滤波运动补偿方法相比较,如图 6 所示。所截取的视频帧分别为第 60 帧、第 80 帧、第 120 帧和第 180 帧。



a 原视频图像序列



b 基准图像序列



c 使用传统 Kalman 滤波的稳像结果



d 使用自适应 Kalman 滤波的稳像结果

图 6 稳像结果

Fig. 6 Video stabilization result

由实验结果可以看出,相比传统的滤波方式,自适应的 Kalman 滤波可以更好地预测运动方向和距离,及时发现并纠正发散现象。

自适应的 Kalman 滤波对运动矢量的滤波效果如图 7 所示,以垂直方向上的向量为例,通过对比传统滤波方法,展示 Kalman 滤波的效果。

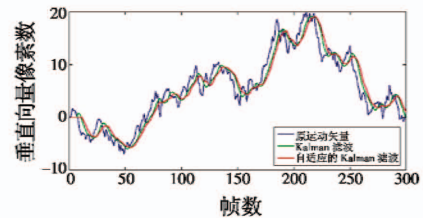


图 7 自适应 Kalman 滤波效果

Fig. 7 Adaptive Kalman filtering effect

实验选取了连续的 300 帧图像,计算每两帧间的运动矢量。从图 7 中可以看出,本文的滤波方法效果明显,追踪效果好。传统的 Kalman 滤波方式因误差估计不足,依然可以看见小幅度的晃动。自适应的 Kalman 滤波可以很好地平滑运动矢量中不稳定的抖动分量,获得较好的滤波结果。

3.2.4 算法评价

采用峰值信噪比 (PSNR) 的方式评价算法,它反映的是基准图像和当前图像间的峰值信噪比。PSNR 的值越大,稳像的效果越好。PSNR 的定义如下

$$R_{\text{PSNR}}(I_1, I_2) = 10 \lg \frac{255^2}{M_{\text{MSE}}(I_1, I_2)} \quad (19)$$

$$M_{\text{MSE}}(I_1, I_2) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2 \quad (20)$$

式中: m, n 分别表示当前帧和基准帧的像素数; I_1 和 I_2 表示这两幅图像的灰度值。计算稳像前后的帧间 PSNR, 结果如图 8 所示。

通过对比稳像前后的 PSNR, 可以明显看出稳像后的 PSNR 值显著提高, 帧间灰度值差距变小, 有良好的稳定效果。

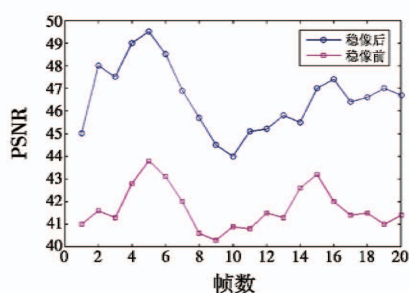


图8 稳像前后 PSNR 对比

Fig. 8 PSNR before and after stabilization

4 结论

本文采用基于改进 AGAST 的特征匹配算法在尺度空间上检测特征点,再对特征点用二进制描述符描述,使用汉明距离进行特征匹配。该算法速度快、效果好,具有良好的尺度不变性和旋转不变性。然后计算仿射变换参数,使用 RANSAC 原则提取特征点,避免运动物体的影响。对得到的运动矢量使用自适应的 Kalman 滤波进行运动滤波并补偿,得到稳定的视频序列。实验结果表明,本文算法具有良好的旋转不变性和尺度不变性,尤其是速度快,同时保证了一定的准确率,配合自适应的运动补偿方式能够有效地预测无人机运动轨迹,获得稳定的视频序列。

参考文献

- [1] HOSSEIN-NEJAD Z, NASRI M. Image registration based on SIFT features and adaptive RANSAC transform[C]// International Conference on Communication and Signal Processing, 2016. doi:10.1109/ICCSP.2016.7754318.
- [2] YANG Q. Real-time optical and digital image stabilization for adaptive optics scanning ophthalmoscopy; US, 20150077706 [P]. 2015-03-19.
- [3] KIM S W, YIN S, YUN K, et al. Spatio-temporal weighting in local patches for direct estimation of camera motion in video stabilization[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2014, 118(3):71-83.
- [4] 吕高杰,张国华,车宏. 电子稳像算法精度评价方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(3):76-79.
- [5] DONG J, XIA Y, YU Q, et al. Instantaneous video stabilization for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Electronic Imaging, 2014. doi:10.1117/1.JEI.23.1.013002.
- [6] 袁威,高跃清,吴金亮. 基于灰度投影和块匹配的无人机视频稳像方法[J]. 无线电工程, 2016, 46(2):19-22.
- [7] KIM P J, LEE K H, YOON Y K. Image stabilization method and electronic device therefor; US, 20150062410A1 [P]. 2015-03-05.
- [8] 张增,张巍,伍小洁,等. 一种适用于电子稳像的图像补偿方法[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(6):54-57.
- [9] WALHA A, WALI A, ALIM I A M. Video stabilization for aerial video surveillance [J]. AASRI Procedia, 2013, 4:72-77.
- [10] LEE T H, LEE Y G, SONG B C. Fast 3D video stabilization using ROI-based warping [J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2014, 25(5):943-950.
- [11] 贾鹤鸣,杨泽文,宋文龙. 基于中心差分卡尔曼滤波的初始对准方法研究[J]. 森林工程, 2016, 32(6):66-70.
- [12] 赵峰. 基于无人机影像的景象匹配系统设计与实现[D]. 沈阳:东北大学, 2010.
- [13] JIANG W T, CHEN W D, LIANG F L I. Electronic image stabilization algorithm based on characteristic point tracking[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1):73-77.
- [14] XU Z, LIU Y, MEI L, et al. Semantic based representing and organizing surveillance big data using video structural description technology[J]. Journal of Systems & Software, 2015, 102:217-225.
- [15] ABDOU S. Devices and methods for minimally invasive spinal stabilization and instrumentation; US, 8764806 [P]. 2014-01-07.



请扫描二维码关注我刊