

快速平滑点特征轨迹电子稳像

陈晓露^{1,2}, 戴明¹, 葛明¹, 郎小龙³

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高机载成像系统输出视频的图像质量, 提出了一种快速平滑点特征轨迹的稳像算法。以消除全局运动估计的帧间匹配累积全局运动、实现长时快速稳像为目的, 建立有别于传统实时稳像模式的系统框架。首先采用 SURF 算法从原始的抖动视频中提取不稳定的特征点; 其次利用 Delaunay 三角剖分算法判断特征点的邻接性, 生成点特征轨迹; 再次采用 Kalman 滤波器对不稳视频中得到的点特征轨迹进行滤波处理, 得到平滑的点特征轨迹; 最后由原始点特征轨迹和平滑点特征轨迹估算出直接需要补偿的全局运动矢量。实验结果表明: 该方法不仅能够实时处理失稳航摄视频, 有效改善机载成像系统的图像质量, 而且能够估计出相互独立的帧间全局运动矢量, 可以应用于需要长时间稳像的场合。

关键词: 电子稳像; 点特征轨迹; 全局运动估计; Kalman 滤波; SURF 算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1988-06

Fast smoothing point-feature trajectories for digital image stabilization

Chen Xiaolu^{1,2}, Dai Ming¹, Ge Ming¹, Lang Xiaolong³

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China)

Abstract: To improve the video's image quality of airborne imaging systems, we proposed a real-time image stabilization system, based on fast smoothing point-feature trajectories. In this paper, a system framework was established to eliminate the accumulative errors between frames in global motion estimation and achieve fast and long-time video stabilization. This framework was different from the traditional real-time video stabilization. Firstly, an improved SURF algorithm was introduced to extract unstable feature points from original shaky video. Secondly, we determined the adjacency of these feature points, generated point feature trajectories with Delaunay triangulation algorithm and smoothed them with Kalman filtering. Then, we could estimate the global motion vectors which directly needed to be

收稿日期: 2013-10-12; 修订日期: 2013-11-15

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400603B); 国家 863 计划(2008AA121803)

作者简介: 陈晓露(1986-), 女, 博士生, 主要从事图像处理与电子稳像方面的研究。Email: cxl5306548@126.com

导师简介: 戴明(1964-), 男, 硕士, 博士生导师, 研究员, 主要从事航空光电成像技术方面的研究。Email: daim@vip.sina.com

compensated from the original point-feature trajectories and the smoothing point-feature trajectories. The experiment results indicate that the proposed method can be used to stabilize unstable aerial video in real time. Also, it can effectively improve the image quality of the airborne imaging systems and estimate global motion vectors between independent frames. So it can be used in long-time image stabilization.

Key words: digital image stabilization; point-feature trajectories; global motion estimation; Kalman filtering; SURF algorithm

0 引言

能否获得高质量的清晰图像决定了战术侦察的效果,航空平台电视摄像设备易受到载体的随机振动和姿态变化的影响,会导致输出图像质量下降,直接表现为图像的帧内模糊和帧间不稳定^[1]。电子稳像就是要通过算法确定图像序列的帧间偏移量并进行补偿,消除帧间抖动以实现动态图像平稳显示。寻求实时高效的电子稳像方法,提高机载成像系统的图像质量和侦查效果是文中研究的重点。

一般传统的实时电子稳像技术包括四个步骤:运动估计、运动滤波、运动补偿和图像补偿^[2]。关键技术是图像序列间的全局运动估计,求出当前帧图像相对于参考帧图像的运动偏移量,是其余三个步骤的基础。传统运动估计的方法有块匹配法、位平面法、灰度投影法和基于特征的方法^[3],由于摄像机存在平移、旋转和缩放等复杂运动,且受到拍摄场景纹理的影响,加上光照变化、局部遮挡等外在干扰,国内外许多学者选择 SURF 算法求取运动矢量得到较为精确的结果^[4-6]。运动滤波用于去除运动矢量中的高频振动,其中运动向量积分算法^[7]和 Kalman 滤波^[8-9]在实时稳像方面都有不错的表现。运动补偿是利用滤波后的运动参数对失稳图像进行校正,Matsushita 等^[2]提出基于运动修复的方法填充了丢失的图像区域实现图像补偿,获得了全帧视觉效果。

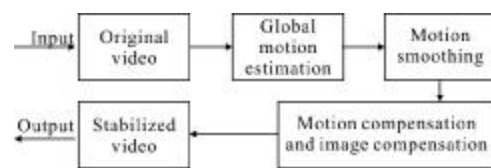
电子稳像系统的传统架构存在一个固有的缺陷,即一旦运动矢量估计错误则不可避免的出现塔罗牌效应,导致稳像的失败。运动估计中对参考帧的选择有两种,一种是以固定帧作为参考帧,只适用于没有扫描运动的摄像系统,另一种是以相邻帧作为参考帧,符合普通摄像的要求,但因其需要对全局运动矢量进行累积故存在累积全局运动,以致不能长时间稳像。

鉴于此,文中深入分析了实时稳像系统的模式,

对传统稳像架构进行了优化,利用 SURF 算法从当前帧中提取图像的点特征形成点特征轨迹,然后直接对点特征轨迹滤波处理得到平滑后的点特征轨迹,即被认为是稳定后的点特征轨迹,从而可从原始点特征轨迹和平滑后的点特征轨迹中直接求取需要补偿的运动矢量值,避免了累积全局运动对稳像质量的影响。

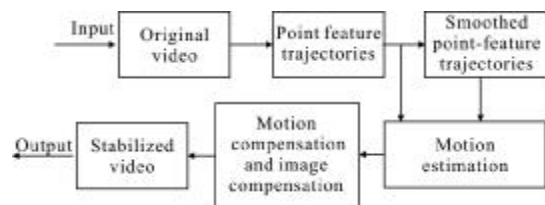
1 系统实现方案

图 1(a)为电子稳像系统传统的构架,传统的电子稳像方法一般通过帧间全局运动估计、运动滤波、运动补偿及图像补偿四个步骤来实现稳像。首先,通过各种不同的全局运动估计方法对图像进行处理,估计出当前帧相对于参考帧的全局运动偏移量,即由摄像机参数或者位置变化而引起的整个图像的变化。然后,对检测到的全局运动矢量进行滤波,提取出摄像机载体不稳定抖动即无意运动,而保留摄像机正常扫描即有意运动。进一步将运动滤波提供的无意运动作为待补偿参数,对各帧图像进行矫正变



(a) 传统电子稳像系统

(a) Traditional digital image stabilization system



(b) 文中电子稳像系统

(b) Proposed digital image stabilization system

图 1 方法实现的原理图

Fig.1 Schematic of algorithm

换。最后,针对矫正变换后某些帧中丢失的区域使用拼接、运动修复等方法进行重构,再现全帧视觉效果。其中帧间全局运动估计决定了整个稳像系统的速度和精度,设视频序列的第 n 帧与第 $n-1$ 帧的全局运动矢量满足下面的变换模型^[10]:

$$f_n = A_n f_{n-1} + B_n \quad (1)$$

则第 n 帧图像相对于第一帧图像的累积全局运动矢量为:

$$f_n = \left[\prod_{k=1}^n A_k \right] f_1 + \sum_{k=1}^n \left[\prod_{m=1}^{k-1} A_m \right] B_k \quad (2)$$

一旦中间出现一次错误的运动估计则整个系统就受到影响,不能完成稳像。

图 1(b)为文中基于点特征轨迹的稳像系统框架。与传统方法不同,基于点特征轨迹的稳像方法利用的补偿参数是独立的帧间全局运动矢量。通过对点特征轨迹的分析可知,平滑以后的点特征轨迹就是原始不稳图像序列期望稳定后的结果,那么就可以直接利用原始的点特征轨迹和平滑后的点特征轨迹来估计全局运动矢量,最终得到独立的运动矢量。于是文中直接利用 SURF 算法提取原始不稳视频每一帧的点特征形成点特征轨迹,然后用 Kalman 滤波平滑这些轨迹,最后将原始的和平滑后的点特征轨迹代入单应性模型中求得待补偿的运动矢量。

2 平滑点特征轨迹的稳像方法

2.1 特征点提取

得到空间上密集且持续时间较长的轨迹是本方法的关键,经实验发现特征跟踪方法^[8]产生的轨迹长但较为稀疏,光流法估计邻帧之间的运动场产生的轨迹密但很短^[2],受到 P.Sand^[11]的启发文中提出新的生成点特征轨迹的方法。

首先利用 SURF 算法提取原始图像帧的特征点。SURF (Speed-Up Robust Features)^[12]是在 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法基础上提出的一种特征检测描述算子,具有尺度不变、旋转不变性,对光照变化、噪声、局部遮挡保持一定的稳健性等特点,且计算速度比 SIFT 快几倍。

原 SURF 算子将区域划分为 16 个子区域,对每个子区域计算二维 Harr 小波响应,每个子区域能计

算出四个向量 $v(\sum dx, \sum dy, \sum d|x|, \sum d|y|)$, 于是一个点特征用 64 维特征信息描述,与 SIFT 用 128 维描述子相比降低了计算时间。但是由于没有对原始图像的特征进行分析,初始提取的兴趣点多且不准确。基于以上两点考虑,文中做如下改进:

先寻找图像的兴趣点,认为兴趣点就是可以被重复检测到的点,然后以该点为中心,选择圆形模板对其考察,取该点周围的 16 个像素分别与该点的像素值进行比较,从而将这 16 个像素分成三类:比该点暗、与该点相似、比该点亮。最后用决策树分类器查询每个类,最终找到熵值最小的类即认为是图像的兴趣点。对描述子的改进,可将区域分成 3×3 的子区域,分别计算小波响应,向量维数降低至 36 维。

2.2 点特征轨迹的形成

利用 SURF 算子在 $t+1$ 帧图像中得到的兴趣点集记为 $\{p_i^{t+1}\}$,再经过以下处理可得到代表相机运动的长轨迹。假设已得到 t_s 帧和 t_e 帧图像间的一条轨迹 l_j 经过 t 帧图像后得到轨迹集 $\Gamma, L_t(i)=j$ 表示将 $t+1$ 帧中提取的第 j 个特征点 p_j^{t+1} 增加到前 t 帧得到的第 i 个轨迹 l_i 。令 v_i^t 表示 t 帧中第 i 个轨迹的运动场,则 $v_i^t(L^t) = p_{L_t(i)}^{t+1} - l_i^t$,其中 $p_{L_t(i)}^{t+1}$ 是轨迹 l_i 上的点 l_i^t 在 $t+1$ 帧中对应的点。对公式(3)最小化找到最佳匹配的特征。

$$F(L^t) = \sum_i \left\| s(l_i^t) - s(p_{L_t(i)}^{t+1}) \right\|^2 + \lambda_t \sum_{(i,j) \in N} \omega_{ij} \left\| v_i^t(L^t) - v_j^t(L^t) \right\|^2 \quad (3)$$

式中: $s(l)$ 为 l 点的 SURF 描述算子; N 为邻接特征点对的数目,第一项判断特征的相似程度,第二项衡量相邻特征运动的一致性。通过 λ_t 调节,既要保证匹配的精度又要保证相邻特征间运动的相似性。

特征点邻接关系的判断是通过 Delaunay 三角剖分算法检测:任意一对特征点同在一个 Delaunay 边,则认为他们是邻接的,再对邻接点判断运动的一致性。如果两个轨迹在过去表现为相似的运动模式,由于它们往往属于同一个物体,则在当前帧中仍可能表现为相似的运动模式。

经过以上处理就将单帧的点特征扩展为帧与帧之间的轨迹,对于消失的和新出现的特征点,还要做

进一步处理。当 $t+1$ 帧提取的特征点数小于已得到的轨迹数时, 则从轨迹集中 Γ 删除这样的轨迹并将其存入轨迹集 Π ; 当下一帧检测到的特征点比当前得到的轨迹多时, 则开始新的轨迹并在下一帧增加到轨迹集 Γ 中。最后我们得到稳定的点特征轨迹集 $\Pi=\{I_i\}$ 。

2.3 点特征轨迹的平滑

从原始不稳图像序列中提取的点特征轨迹同时包括有意运动和无意运动, 有意运动是低频扫描运动, 无意运动为高频振动。从工程应用角度出发, 文中采用 Kalman 滤波实时的平滑点特征轨迹。

令 $\{p_k^i\}$ 为获得的第 i 个点特征轨迹 I_i 上的特征点集, $(p_{kx}^i, p_{ky}^i), (v_{kx}^i, v_{ky}^i)$ 分别表示第 k 个特征点的位置和速度。状态矢量和观测矢量分别定义为 $X_k^i = [p_{kx}^i, v_{kx}^i, p_{ky}^i, v_{ky}^i], Z_k^i = [p_{kx}^i, p_{ky}^i]$, 建立文中稳像系统的状态方程和测量方程如公式(4)和公式(5):

$$X_{k+1}^i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X_k^i + \begin{bmatrix} 0 \\ N(0, \sigma_{r,x}) \\ 0 \\ N(0, \sigma_{r,y}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z_{k+1}^i = Z_k^i + \begin{bmatrix} N(0, \sigma_{q,x}) \\ N(0, \sigma_{q,y}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $[0, N(0, \sigma_{r,x}), 0, N(0, \sigma_{r,y})]^T$ 为过程噪声协方差矩阵; $[N(0, \sigma_{q,x}), N(0, \sigma_{q,y})]^T$ 为测量噪声协方差矩阵, $N(0, \sigma)$ 表示均值为 0, 标准差为 σ 的高斯函数。通过改变过程噪声和测量噪声的协方差矩阵控制点特征轨迹的平滑度。过程噪声决定期望的有意运动轨迹的平滑度, 方差越大则有意运动的随机性越大, 方差为零则运动完全补偿即稳定后的图像序列不存在任何运动; 测量噪声的作用与过程噪声相反, 如果其方差为零则表示图像序列没有得到稳定。实际操作中根据不稳视频的运动性质调整两个参数, 得到平滑的点特征轨迹。

2.4 求取全局运动矢量

图像帧间运动是由摄像机的各种运动引起的, 为了估算用于运动补偿的全局运动矢量, 可以用单应性模型表示这种映射关系。同时考虑准确性和计算时间, 使用如公式(6)所示的六参数仿射模型。经过 Kalman 滤波后, 输入的第 i 个点特征轨迹中的第

k 个特征点以平滑后的点特征轨迹中的第 k 个特征点 \hat{p}_k^i 输出。

$$\hat{p}_k^i = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 \end{bmatrix} p_k^i + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

仅通过三对特征点就可求出仿射变换的参数, 得到直接需要补偿的全局运动矢量。在特征点选取的最优问题上, RANSAC(Random sample consensus) 是一种常用的方法, 但比较费时, 文中在充分利用轨迹特点的基础上提出一种快速方法, 算法如下:

第一步, 设定一个阈值 T , 如果轨迹 I_i 包括的特征点数 $n \geq T$ 就保留此轨迹, 否则舍弃该轨迹。

第二步, 衡量轨迹 I_i 对 t 帧图像的影响, 设定一个权值:

$$\omega_i^t = \frac{t_i^t}{\sum_{j \in \Pi(t)} N(|I_j^t - I_i^t|; \sigma_s)} \quad (7)$$

式中: $t_i^t = \min(t - t_s(I_i), t_e(I_i) - t)$; $t_s(I_i)$ 和 $t_e(I_i)$ 分别表示轨迹开始的帧数和结束的帧数; $\Pi(t)$ 为 t 帧图像的轨迹集。如果一帧图像在一条轨迹的中间位置则说明这条轨迹对此帧的影响很大, 在两端则表明该轨迹在该帧图像中是新出现的或即将消失的, 影响较小。

第三步, 将 t 帧图像中的轨迹按长度和影响力以列向量的形式由大到小的顺序存储, 分别提取前三条轨迹, 在原始的点特征轨迹和与之对应的平滑后的点特征轨迹中选取 3 对特征点, 代入公式(6)计算全局运动矢量。

得到所有图像帧的帧间全局运动矢量后, 将不稳视频的每一帧按照所求的运动矢量反方向补偿, 对出现的亚像素采用最邻近插值补偿方法。最后通过图像增强、图像拼接和运动修复等图像补偿方法进一步提高图像的成像质量, 输出满足视觉要求的稳定视频。

3 实验结果与分析

为了验证方法的有效性, 用 4 组不同分辨率不同长度的失稳航拍视频进行稳像实验 (如图 2 所示), 并将文中算法与灰度投影算法、Kalman 滤波算法^[9]和参考文献[8]这几种实时稳像方法进行了比较。

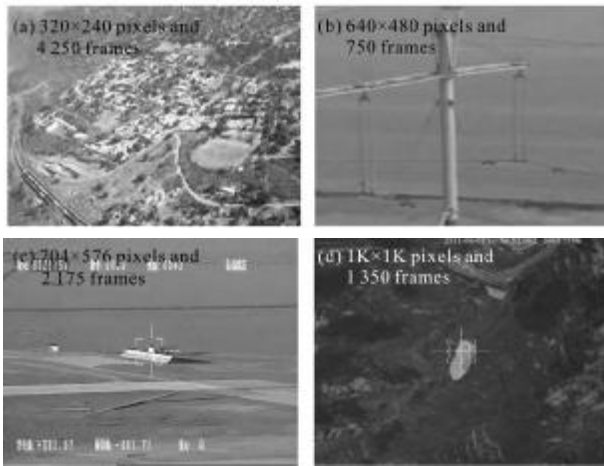


图 2 实验视频
Fig.2 Experimental video

3.1 测试算法长时间稳像的能力

图 3 列出了文中算法与其他几种方法处理失稳航摄视频的结果,左列为第 335 帧原始不稳图像和各方法处理后的结果,右列为第 485 帧原始不稳图像和各方法处理后的结果。实验选用分辨率为 320x



(a) 原图像
(a) Original images



(b) 灰度投影算法的稳像结果
(b) Results by gray projection algorithm



(c) Kalman 滤波算法的稳像结果
(c) Results by Kalman filtering



(d) 参考文献[8]的稳像结果
(d) Results by reference [8]



(e) 文中方法的稳像结果
(e) Results by proposed method

图 3 文中方法与几种实时稳像方法的比较
Fig.3 Comparison between proposed method and some real-time stabilization methods

240 的航摄视频,因为该视频持续时间较长且有显著的扫描运动,视频总长度为 4 250 帧。灰度投影算法和 Kalman 滤波算法用求取的累积全局运动矢量作为补偿量,因误差的逐帧积累而发生“漂移”,最终分别第 531 帧和第 820 帧失稳。文中方法和参考文献[8]从原理上消除了累计全局运动的影响,运行较长时间仍能表现较好的稳像效果,分别运行到第 2 654 帧和第 2 602 帧失稳。分析失败的原因发现视频从第 2 590 帧开始逐渐由地面向天空转移,到了第 2 602 帧 70%以上的区域是天空,在第 2 654 帧背景全是没有任何特征的纯色天空,提取不到足够多的特征点是两种算法失效的根本原因。而文中算法之所以比参考文献[8]稳定的时间更长是因为文中形成的点特征轨迹比用 KLT 算法形成的点特征轨迹要密,从而保留了更多的细节信息。

3.2 测试算法的效率

为了验证算法的计算效率,在一台处理器为 Core Duo CPU 2.8 GHz 的 PC 机上进行稳像实验。用灰度投影算法、Kalman 滤波算法、参考文献[8]方法和文中方法平均处理一帧图像的时间对比如表 1 所示。灰度投影算法由于只需要对图像的行列进行投影再做互相关运算,算法简单,因此计算速度最快;Kalman 滤波、参考文献[8]和文中方法的运行速

度一方面受到图片大小的限制但更重要的还是依赖于图像中的特征,细节越丰富、提取的特征点越多则越耗时。文中方法略慢于前两种方法是因为文中在形成点特征轨迹和求取全局运动矢量的算法优化上多做了一些工作,但还是能够实现实时处理。

表 1 不同算法单帧稳像性能比较

Tab.1 Performance comparison among different algorithms

	Image size/pixels	Gray projection	Kalman filtering	Ref. [8] method	Proposed method
Time/ ms	320×240	14.80	24.58	25.87	28.52
	640×480	21.17	26.39	28.66	36.41
	704×576	25.49	27.31	29.94	38.04
	1K×1K	34.37	53.72	56.89	76.56

4 结 论

文中根据机载航拍视觉系统对视频图像视觉质量的要求,提出了一种快速平滑点特征轨迹的稳像算法。首先,分析了实时电子稳像传统模型的固有缺陷,在此基础上提出以长时稳像为目的的改进模型;然后,重点研究了利用点特征轨迹稳像的方法,并针对生成的点特征轨迹提出了求取全局运动矢量的优化方案;最后,针对四组不同分辨率不同长度的失稳航拍视频进行稳像实验。实验结果表明:文中方法能够快速明显地稳定失稳的航拍视频,处理一帧 320×240 的图像平均用时 28.52 ms,与先进实时稳像算法水平相当,且稳像时间更长,为机载航拍视频图像的实时和长时稳像提供了理论依据。此外,应当指出的是所提方法依然受限于提取的特征和选择的单应性模型,对有明显景深变化的视频可借助 3D 稳像的一些方法,另外也可选择一些更快的提取特征的方法来提高速度。

参考文献:

[1] Sun Hui, Zhang Bao, Liu Jinghong, et al. Electronic image stabilization for aerial E-O imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1280-1286. (in Chinese)
孙辉, 张葆, 刘晶红, 等. 航空光电成像电子稳像技术[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1280-1286.

[2] Matsushita Y, Ofek E, Ge W, et al. Full-frame video stabilization with motion inpainting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(7): 1150-1163.

[3] Wang Zhiming, Xu Xiaogang. A survey on electronic image stabilization [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 470-480. (in Chinese)
王志民, 徐晓刚. 电子稳像技术综述 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 470-480.

[4] Zhang Kun, Xu Tingfa, Wang Ping, et al. Real-time full-frame digital image stabilization system by SURF [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1964-1972. (in Chinese)
张坤, 许廷发, 王平, 等. 高精度实时全帧频 SURF 电子稳像方法[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(8): 1964-1972.

[5] Wang Hong, Ji Xiaoqiang, Dai Ming, et al. Improved speed up robust features matching algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 811-817. (in Chinese)
王洪, 嵇晓强, 戴明, 等. 一种改进的快速鲁棒性特征匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 811-817.

[6] Huang K Y, Tsai Y M, Tsai C C, et al. Video stabilization for vehicular applications using SURF-Like descriptor and KD-Tree [C]//IEEE 17th International Conference on Image Processing, 2010: 3517-3520.

[7] Battiato S, Gallo G, Puglisi G, et al. Sift features tracking for video stabilization[C]//International Conference on Image Analysis and Processing, 2007: 825-830.

[8] Yeon G R, Myung J C. Robust online digital image stabilization based on point-feature trajectory without accumulative global motion estimation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(4): 223-226.

[9] Wang C, Kim J H, Byun K Y, et al. Robust digital image stabilization using the kalman filter [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(1): 6-14.

[10] David L. Video stabilization and target localization using feature tracking with small UAV video[D]. America: Brigham Young University, 2006.

[11] Sand P, Teller S. Particle video: Long-range motion estimation using point trajectories[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 80(1): 72-91.

[12] Herbert B, Tinne T, Lucvan G. SURF: speeded up robust features [C]//European Conference on Computer Vision, 2006: 404-417.