

红外激光车载云台去抖动设计

熊晶莹^{1,2}, 戴明¹, 赵春蕾¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 车辆行驶产生的颠簸、晃动, 会严重影响红外激光车载云台采集视频的质量, 不利于信息的观察和判读。为了改善视频质量, 提出一种实时有效的车载电子稳像方法。首先, 用非线性扩散滤波建立尺度空间, 使视频帧在无损精度的前提下突出边缘信息; 然后, 采取图像亮度信息与梯度信息相结合的特征提取策略, 利用图像亮度信息快速搜索潜在特征点并记录其位置, 并通过分析其梯度信息与预判条件的对比结果来选取优质特征点, 在特征描绘阶段, 通过增强二值特征描绘器之间的显著性和差异性, 提升特征量的辨别力; 最后, 通过位置验证辨别相似特征, 提高全局运动矢量估计精度。时间比对实验表明提出的算法能够满足实时处理的要求, 在分辨率为 720 P 时也能达到每秒处理帧频大于 60 帧; 有效能力对比实验中, 新方法的重重复度均高于 65%, 明显提高了特征探测能力, 并且在加入去抖动设计后 6 组实验的帧间转换精度分别提升了 46.8%、30.8%、28.44%、28.1%、33.9% 和 53.4%, 表明该方法极大地改善了抖动视频的稳定性和视频信息提取的准确度。

关键词: 电子稳像; 车载云台; 特征提取; 尺度空间; 二值描绘器

中图分类号: TP751 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0126002

Dejitter design for infrared laser vehicle cloud platforms

Xiong Jingying^{1,2}, Dai Ming¹, Zhao Chunlei¹

- (1. 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)

Abstract: The quality of vehicle records was seriously influenced along with the bumping and shaking driving, and the jittering videos would impact observer reading and interpreting the information. In order to improve the quality of the records, a real-time image stabilization method for vehicle cloud platforms had been proposed. Firstly, the nonlinear filter was adopted to build scale space for the purpose of highlighting edge information; Secondly, a feature detection combined fast image brightness test and gradient calculation was put forward for more quality features, furthermore, increasing the self-saliency and differences between descriptors brought discriminative power; Finally, similar features was availably distinguished by location verification for accurate estimation of global motion vector. The time experimental results shown that the proposed approach fulfilled the task of real-time, and the average frame rate is over 60 even when the resolution is 720 P. In effective capability experiments, the repeatability of

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 熊晶莹(1989-), 女, 博士生, 主要从事图像处理及工程应用方面的研究。Email: xiong_ing@163.com

导师简介: 戴明(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事机载设备图像处理等方面的研究。Email: daim@vip.sina.com

new method is more than 65%, which indicates the enhancement of detection power. Furthermore, the ITF of 6 group tested increase 46.8%, 30.8%, 28.44%, 28.1%, 33.9% and 53.4% after dejitter design, which illustrates that the method significantly improves the effectiveness and precision of the vehicle image stabilization algorithm.

Key words: electronic image stabilization; vehicle cloud platforms; feature detection; scale space; binary descriptor

0 引言

近年来,中国警用车辆上已经普遍装备了红外激光车载云台,用于全天候路况信息监测、覆盖区事故场景还原等。但受成本和体积所限,绝大部分警用红外激光车载云台均未应用陀螺稳定技术,难以保证车辆行驶在颠簸、晃动状态下拍摄到清晰稳定的视频记录,故而采用电子稳像技术^[1-3]进行红外激光车载云台记录视频信息的去抖动设计。

国内外诸多学者对电子稳像方法进行了深入的研究,其中基于特征点提取与匹配的方法受到了广泛的关注。根据特征信息描绘的方式可将基于特征提取与匹配的方法分成两类:即欧式空间类方法和汉明空间类方法。SIFT^[4]被广泛认为是欧式空间中里程碑式的方法,其通过高斯卷积建立尺度空间金字塔,并在图像金字塔中计算梯度极值,构建了具有方向的尺度不变特征,该方法的计算精度高但计算量巨大。随后的类 SIFT 算法都在保留原方法有效性的基础上,尽可能地优化运算时间。其中,SURF^[5]被认作最成功改进方案,它利用积分图和快速海森矩阵探测器相对 SIFT 在执行效率和有效性能两方面得到提升,但仍然很难达到算法实时性的要求。而直接利用灰度图像亮度信息进行比对提取角点,使基于特征提取与匹配类方法由欧式空间转向了汉明空间。汉明空间类方法采用灰度图像的亮度信息分割角点,并通过预设模板对特征角点与周围像素建立联系,生成特征描绘器,其特点是处理速度极快,但鲁棒性较差、特征点对误匹配率较高,受到热点关注的算法有 BRISK^[6-7]、ORB^[8]、FREAK^[9]。

文中提出一种适应全天候的实时有效的电子车载稳像方法。首先基于算法实时性的要求,采用亮度信息快速探测图像中的潜在特征点,并设计了一种显

著性较强的二值特征描绘器。然后,为提升算法的有效性,利用非线性扩散滤波使视频内容中的边缘信息被突出,并通过计算潜在特征点与周围区域的梯度信息,选取优质特征点。最后,通过特征位置信息复验的方法减少因路况中的相似信息引起的全局运动估计精度下降。实验证明,文中提出的算法在计算能力受限和严格实时条件下,依然具有良好的鲁棒性,有效改善了车载云台拍摄系统拍摄视频的稳定性。

1 理论分析

红外激光车载云台主要由可见光摄像机、微光摄像机、非制冷红外热像仪等光电传感器、具有俯仰、方位两自由度云台和车内视频显示、云台控制终端组成。车内人员通过终端控制云台转动,改变光电传感器的监控范围;通过调整镜头焦距改变监控区域大小和监控细节。

车载云台视频帧的标准化分辨率为可见光 720 P 和红外光 480 P。云台控制终端的计算能力有限,但有严格的视频帧实时处理的需求,汉明空间类算法快速性的优势使之更适合云台的去抖动设计。为了适应全天候不同场景的拍摄条件,该类算法极需提升其的鲁棒性。因此,文中分别在视频帧预处理阶段、特征提取阶段和建立特征描绘阶段提出了方法和改进,以快速实现准确的运动估计,提高稳定精度。

受车载云台仅存在方位、俯仰两个方向上自由的限制,获取到的视频帧中,主要的运动形式为平移和缩放,常见的运动形式还有轻微的视角变换,而旋转变化不明显。因此,在特征描绘时,应着重考虑特征描绘器的尺度不变性和自身差异性。

2 车载云台去抖动设计

文中提出的方法流程图如图 1 所示,主要分为

4 个阶段,依次为:视频帧的预处理、特征角点的提取、特征描绘器的生成和全局运动矢量估计。

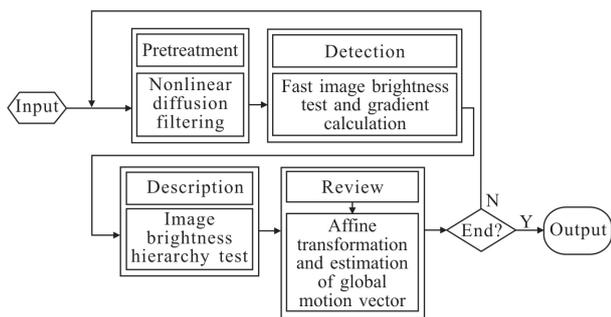


图 1 去抖动设计流程图

Fig.1 Processing diagram of dejitter design

2.1 视频帧的预处理

特征的尺度不变性是通过每个视频帧建立尺度空间获得的。基于特征提取与匹配类算法常采用与高斯滤波函数进行卷积,但视频帧的尺寸会随着卷积次数的增加而减小,在损失精度的同时图像中的边缘信息也被模糊化,不利于特征角点的提取与描绘。

因此,文中采用非线性扩散滤波^[10-11]代替高斯滤波建立尺度空间,非线性扩散滤波是将图像中的亮度变化视为光流函数的散度,通过设置合适的传导函数,使非线性扩散自适应于图像不同区域结构,保护了边缘信息,有利于特征点提取算法提取到高质量的特征点。

首先,选取公式(1)为传导方程:

$$g = \frac{1}{1 + \frac{|\nabla L_\sigma|^2}{\lambda^2}} \quad (1)$$

式中: ∇L_σ 是通过计算平滑后的输入视频帧图像(原始图像) L 的梯度图像; λ 为平滑后的图像 L 灰度梯度直方图中 70% 位置上的值; σ 为高斯滤波核。

然后,可依据一组给定的进化时间 t_i 建立尺度空间:

$$\begin{cases} t_i = \frac{1}{2} \sigma_i^2 \\ L_{i+1} = [I - (t_{i+1} - t_i) \sum_{l=1}^m A_l(L_i)]^{-1} L_i \quad i \in [0, 1, \dots, N] \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为高斯滤波核; L_0 即输入帧图像(原始图像)是尺度空间的最底层; I 是单位矩阵; A_l 是通过公式(1)计算得到的传导信息的矩阵; N 是尺度空间图

像层的总数。

2.2 特征角点的提取

汉明空间类方法采用 FAST^[12]通过比对像素点间的亮度值进行快速角点分割,可以在短时间内提取到了大量的特征角点,但特征的品质无法辨别,是导致汉明空间算法误匹配率高的原因之一。

因此,文中提出一种亮度信息与梯度极值相结合的特征提取策略:首先,运用 FAST 方法通过亮度值比对,在尺度空间的每一层探测潜在关键点,记录其所在的层数和位置;然后,对潜在关键点及其周围区域引入梯度计算并求取极值,结合 Shi-Tomasi^[13]角点概念,设计尺度强角点来提取优质特征点。

Shi-Tomasi 角点提取方法判定若一个像素点的响应函数 R 的值大于预先设定的阈值,且这个预先设定的阈值小于 $\min(\lambda_1, \lambda_2)$,则该像素点被判定为一个强角点。

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (3)$$

式中: λ_1 和 λ_2 是下式矩阵 T 的两个特征值。

$$E(u, v) = \sum_{x, y} \begin{bmatrix} (u, v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \sum \left[(u, v) T \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

式中: $E(u, v)$ 是灰度图像窗口 (u, v) 的灰度变化结果; I_x^2 、 $I_x I_y$ 和 I_y^2 是图像 $I(x, y)$ 在纵横两个方向上的二阶导数和偏导数。

为适应非线性扩散尺度空间,需要为响应函数 R 增加尺度变量:

$$\begin{cases} \sigma_{i, \text{norm}} = \frac{\sigma_i}{2^\sigma} \\ L_{\text{Harris}}^i = \sigma_{i, \text{norm}}^2 (L_{xx}^i L_{yy}^i - L_{xy}^i L_{xy}^i) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 是尺度因子; L_{xx}^i 、 L_{yy}^i 和 L_{xy}^i 分别是灰度变化在纵横两个方向上的二阶导数和偏导数。

通过亮度信息与梯度极值相结合方法提取的特征角点更易分布在两种物体的交界处,不易发生扭曲形变,有着极强的显著性。

2.3 二值特征描绘器

汉明空间类算法的描绘器是一组高维数的二进制字符串,建立起特征角点与周围像素的联系,用以进行匹配。根据前文的分析,针对车载云台设计的特征描绘器应有较强的自身显著性和与他差异性。BRISK 算法^[6-7]是汉明空间类算法中较为有效的二

值特征描绘方法。但其设计通过模板中长距离点对计算描绘器的方向,却非车载云台模型所需,且建立旋转特性增加描绘器生成的时耗。因此,文中建立的描绘器借用 BRISK 特征描绘器模版,如图 2 所示。采样模板上共有 60 个采样点,中间排列密集而外沿较为稀疏。描绘时,比对两两两采样点之间的亮度值作为描绘器,亮度的梯度变化作为描绘器的方向,而文中提出一种由广及深的描绘方法提出一种由广及深的描绘方法以增强描绘器之间的差异性,并为亮度比对增加预设值以进一步提高其自身的显著性。

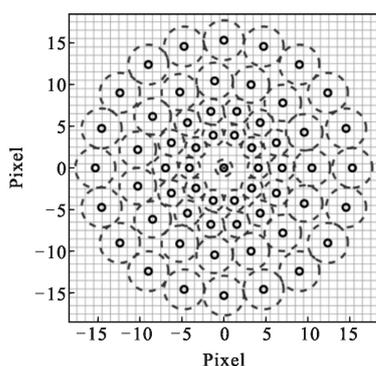


图 2 BRISK 描绘采样模板

Fig.2 BRISK describing-sampling pattern

首先,将 512 维的亮度实验拆分为 4 族,每族 128 维的亮度比对,不为描绘器指定方向。在第 1 族试验中,为了建立特征角点与周围的联系,从 BRISK 长距离点对中选取的较多组进行比对,而短距离点对中选取组则很少。在第 2 族实验时,增加短距离点对的选取比例,目的是使亮度比对结果中角点本身的特征信息增加,与周围联系的信息适当减少。由此,第 4 族比对的选取组几乎全部来自短距离点对,其结果中包含信息的意义是特征和特征之间的不同。最后将 4 族实验结果依序组合,组成 512 维由广及深的描绘器。

$$A = \{(P_i, P_j) \in R^2 \times R^2 | i < N \wedge j < i, j \in N\},$$

$$\begin{cases} S = \{(P_i, P_j) \in A | \|P_i - P_j\| < 9.75t\} \subseteq A \\ L = \{(P_i, P_j) \in A | \|P_i - P_j\| > 13.67t\} \subseteq A \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 表示图 2 中所有采样点对 (P_i, P_j) 的集合; S 代表短距离点对; L 表示长距离点对;而 t 则表示尺度因数。

在进行特征描绘器匹配时,首先取出第一族进行搜索辨别,可以有效缩减找到对应项的时间。

此外,在亮度比对实验中,增加预设阈值可强化亮度信息描绘内容的差异,从而提高描绘器的显著特性:

Diff(threshold):

$$b = \begin{cases} 1, \text{abs}[I(P_i) - I(P_j)] > \text{threshold} \\ 0, \text{其他情况} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $I(P_i)$ 和 $I(P_j)$ 是 P_i 和 P_j 两点的亮度值。

2.4 特征位置验证

路况信息中的虚实线、护栏等景物,它们每段与每段之间自特征极为相似,是导致特征误匹配的原因之一。因此文中提出通过特征角点匹配的位置验证,抑制具有相似特征的重复景物引起的错误匹配。根据实验分析结果,可以得出一对特征角点匹配对在参考帧和当前帧中的对应位置应满足如下关系:

$$\begin{cases} -50 \leq k \times (x_2 - x_1) \leq 50 \\ -30 \leq k \times (y_2 - y_1) \leq 30 \end{cases} \quad (8)$$

式中: (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为参考帧和当前帧中的一对特征角点匹配对; k 为分辨率系数。如果视频的尺寸是非标准的视频尺寸制式,则选取相近尺寸的分辨率系数。

3 性能测试与分析

针对激光红外车载云台模型,分别设计了算法执行时间实验和算法有效性能力实验。图 3 中展示



图 3 实验采用视频源截图

Fig.3 Screenshots of video source used in experiment

了所采用的视频帧截图,其中前三组为可见光,后三组为红外与激光。图 3(a)拍摄于快速路上,车辆行驶速度较快,路面上车辆信息较为丰富,背景信息相对不明显;图 3(b)为市内夜间行车拍摄场景,车速较慢;图 3(c)拍摄于日间市内高架桥上,车速适中;图 3(d)是夜间红外相机拍摄视频;图 3(e)为激光夜视仪拍摄夜间车辆视频;图 3(f)为激光相机 300 m 远景拍摄。文中测试代码基于 Microsoft Visual Studio 2010 平台和 OpenCV2.4.10 库函数,模拟实验

所用处理器为 Inter® Core (TM) i5-3317U CPU @1.70GHz, 4.00GB RAM。

3.1 算法执行时间对比实验

影响算法执行时间的两个主要因素分别为图像像素尺寸和提取的特征点个数。在算法执行时间对比实验中,为了保证实验的公正性,在维持一定的算法重复度和充足特征数量计算仿射变换的前提下,通过设置各个算法特征点提取时的阈值,使所有算法提取到的特征点数量保持一致。图 4 中实验视频 a~f 中提取的特征点数依次约为 94、96、104、51、61 和 58。

图 4 和表 1 显示各实验算法的每秒处理帧频数的对比结果,表 1 中一般车载云台的实时帧频配置为 30 帧/s。实验结果表明,能够满足实时要求的算法有 BRISK、ORB 和文中算法,其中 BRISK 与文中算法在时间上的优势较为明显。BRISK 在提取特征点时由于只采用了 FAST 快速分割,因此特征提取速度比文中算法快;而文中算法针对红外与激光平台的特点,设计了去旋转增强自身显著特性的描绘器,因此在特征描绘和特征匹配阶段,执行速度比

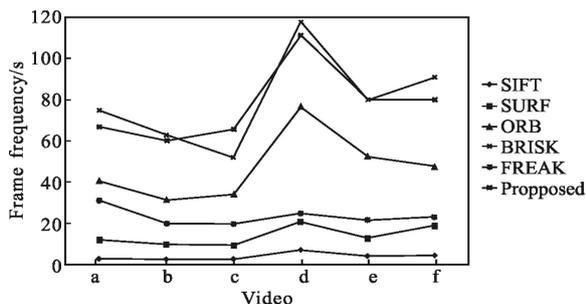


图 4 每秒平均帧数对比结果

Fig.4 Comparison result of average frame rate

表 1 每秒平均帧数对比结果

Tab.1 Comparison results of average frame rate

Video	Resolution	Frame frequency per second					
		SIFT	SURF	ORB	BRISK	FREAK	Proposed
a	720 P	2.94	12.10	40.75	74.93	31.25	66.96
b	720 P	2.78	10.01	31.45	62.83	20.20	60.26
c	480 P	2.67	9.67	34.21	51.72	19.91	65.67
d	480 P	7.35	21.05	76.92	117.65	25.00	111.11
e	480 P	4.44	13.16	52.63	79.92	21.74	80.00
f	480 P	4.62	18.87	47.62	90.91	23.38	80.00

BRISK 要快。图 4 中视频 c 和 e 中场景内容的复杂程度低于另 4 组,因此 BRISK 提取特征的快速性对加快整个算法执行时间的贡献不显著,而相对地文中算法快速特征描绘和特征匹配的优势就被显现出来了。

3.2 特征探测能力实验

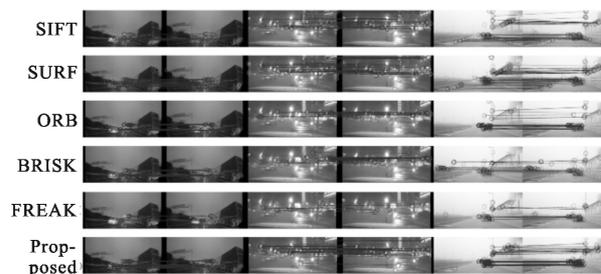
在对比特征提取与描绘算法探测能力的实验中,采用重复度^[14]来说明算法的有效性。特征角点的重复度是指所有特征描绘器在当前帧与参考帧中均出现的比例,即相应特征量对数量与两帧图像中提取到的特征点数量较小者的比值:

$$\text{Repeatability} = \frac{\text{num of corresponding keypoint pairs}}{\min(N_i, N_j)} \quad (9)$$

式中: N_i 和 N_j 分别是参考帧 j 和当前帧 i 中提取到的特征点数量。如果在两帧中一个特征点的两个描绘器对应的重叠区域面积不小于 50%, 则被认定为一个特征量对。重复度值越高,说明特征提取与匹配算法的鲁棒性越好。

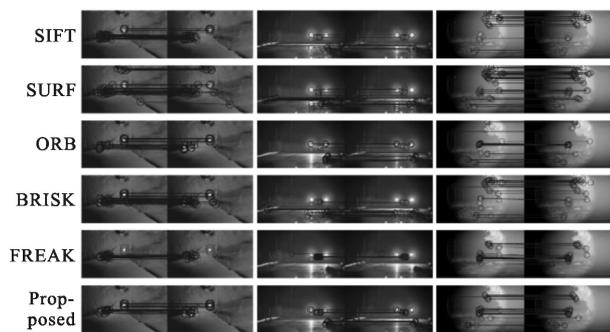
为了保证实验的公正性,通过调整各个算法特征点提取时的阈值,基于各算法在提取到的特征点数量基本一致的条件下,选取其重复度的极大值做为实验结果。

图 5(a)和(b)中有连线的圆圈及其连线代表两帧图像上匹配到的特征点对,而单独的圆圈表示未匹配到或错误匹配的特征角点。因此图 5(c)中的结果也可以理解为图 5(a)和(b)中连线的圆圈及其连线与两帧图像中连线的与单独的圆圈总和较小者的比值。从实验结果图 5(a)和(b)中还可知,基于文中方法所提取的特征点多分布于景物明暗交界明显的位置,其有着更强的显著性。从图 5(a)和(b)的对比可发现,红外与激光场景中从景物到背景灰度变化明显,因此各算法提取到的特征相对于可见光组更显著,从而图 5(c)中的结果右边红外与激光组的重复



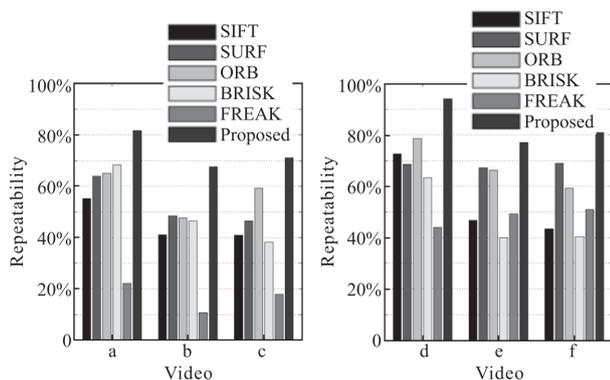
(a) 可见光组实验

(a) Experiment of visible light group



(b) 红外光与激光组实验

(b) Experiment of infrared light and laser group



(c) 特征探测能力对比实验重复度结果

(c) Repeatability results of feature detection capability comparison experiment

图 5 特征探测能力对比实验

Fig.5 Detection power experiments

度值普遍高于左边可见光组。图 5(c)中数据表明,文中方法在不同场景中的重复度均优于其他算法,明显改善了基于特征提取与匹配类算法的鲁棒性。

3.3 相似特征的位置验证实验

通过锁定特征可能出现的位置区域,抑制等距相似特征之间的错误识别。从图 6 对比实验中可知,抑制后的特征匹配对全局运动矢量的一致性要优于前者,说明采用文中提出的方法提高了全局运动矢量估计的准确度。

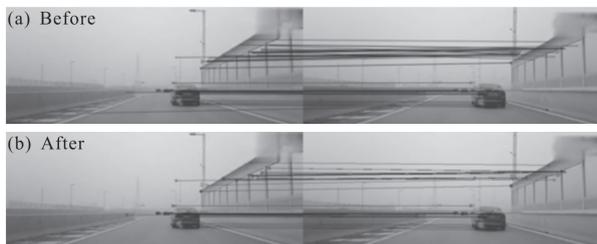


图 6 特征位置验证前后的对比结果

Fig.6 Comparison results of before and after feature position verification

3.4 抖动视频稳定实验

文中采用帧间转换精确度 ITF^[15]来测试各算法的有效性,以对比各算法稳定视频的能力,其定义为:

$$ITF = \frac{1}{N_{frame-1}} \sum_{b=1}^{b=N_{frame-1}} 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE(I_a, I_b)} \quad (10)$$

式中: N_{frame} 表示测试视频源的总帧数; I_a 表示视频序列中的某帧; I_b 表示经过稳像后的 I_a 对应帧; MSE 表示两帧图像的均方差。

每段视频截取了前 200 帧作为实验输入。帧间转换精度越高,则说明视频帧的抖动剧烈程度越低,算法稳定视频的效果越好。实验结果如表 2 所示,在加入去抖动设计后 6 组实验的帧间转换精度分别提升了 46.8%、30.8%、28.44%、28.1%、33.9% 和 53.4%,表明该方法极大地改善了抖动视频的稳定性 and 视频信息提取的准确度,非常适用于车载视频的稳像。

表 2 帧间转换精度对比结果

Tab.2 Contrast results of ITF

Video	ITF						
	Original	SIFT	SURF	ORB	BRISK	FREAK	Proposed
a	26.49	34.16	33.65	32.92	30.84	28.14	38.88
b	24.23	29.96	29.59	27.11	28.86	25.11	31.77
c	25.32	31.10	30.66	29.06	29.01	27.88	32.52
d	22.61	23.92	26.16	24.45	25.29	23.10	28.96
e	43.32	53.62	51.35	49.67	52.71	46.28	58.04
f	40.35	49.68	47.63	50.44	51.51	43.39	61.89

为了更直观地展示稳像效果,图 7 中给出了视频 a 经运动补偿后的一帧图像与原始视频帧进行残差计算,残差越小则运动补偿效果越好。

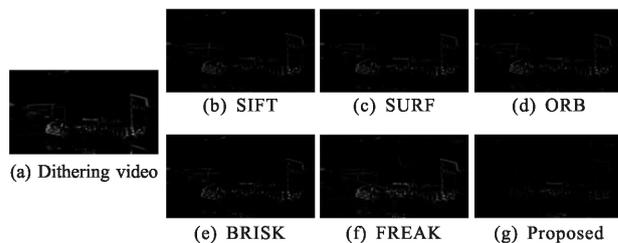


图 7 帧内抖动视频稳定实验残差对比结果

Fig.7 Results of residual difference comparison in intra-frame jitter video stabilization experiment

4 结论

为了提高红外激光云台在车辆行驶遇颠簸路况

时视频采集的质量,文中提出了一种实时有效的车载电子稳像方法。在视频帧的预处理阶段,采用非线性扩散滤波建立尺度空间进行,使视频帧在无损精度的前提下突出边缘信息;在特征提取阶段,提出图像亮度信息与梯度信息相结合的提取策略,实现以较快的执行速度探测出强显著性的特征角点;在特征描绘阶段,通过设计由广及深的描绘方法以增强描绘器之间的差异性,并为亮度比对增加预设值以进一步提高其自身的显著性;最后,在估算全局运动之前,通过限定特征角点匹配对的位置,抑制具有相似特征的重叠景物引起的错误匹配。经实验验证,文中算法实时处理帧频可达 60 帧/s 以上,全天候不同场景特征提取的重复度均超过 65%,并且显著提高采集视频的帧间转换精度,实现了对严格实时条件限制且计算能力受限的车载云台模型的有效视频稳定,很好地保障了车载云台对交通路况信息的稳定记录,对降低事故误判率、提升事故解决率、减少责任归属纠纷等具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Lai Lijun, Xu Zhiyong, Zhang Xuyao. Improved gradient optical flow for digital image stabilization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0428004. (in Chinese)
- [2] Ji Shujiao, Zhu Ming, Hu Hanping. Aero-borne electronic image stabilization based on feature point matching [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 841-849. (in Chinese)
- [3] Wu Wei, Xu Tingfa, Wang Yawei, et al. High precision digital image stabilization with full frame compensation [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 378-385.
- [4] David G L. Object recognition from local scale-invariant features [C]//The Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 2(3): 1150-1157.
- [5] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc V G. SURF: Speeded up robust features [J]. *Computer Vision-ECCV*, 2006, 110(3): 404-417.
- [6] He Linying, Liu Jinghong, Li Gang, et al. Fast image registration approach based on improved BRISK [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2722-2727. (in Chinese)
- [7] Ji Shujiao, Zhu Ming, Lei Yanmin, et al. Video stabilization with improved motion vector estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1458-1465. (in Chinese)
- [8] Dai Xuemei, Lang Lang, Chen Mengyuan. Research of image feature point matching based on improved ORB algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(2): 233-240. (in Chinese)
- [9] Chris Whiten, Robert Laganieri, Guillaume A. Bilodeau. efficient action recognition with MoFREAK [C]//Computer and Robot Vision(CRV), 2013 International Conference, 2013, 10(1): 319-325.
- [10] Yu Fei, Zhan Xingqun, Liu Ming. Stereo vision tracking and measurement system based on KAZE feature [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(2): 30-33. (in Chinese)
- [11] Geng Zexun, Xu Zhijun, Lu Lanxin, et al. Improved KAZE feature matching algorithm with viewpoint change robustness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 616-625. (in Chinese)
- [12] Elmar Mair, Gregory D H, Darius Burschka, et al. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV'10), 2010, 6312: 183-196.
- [13] Zhao Chenchen, Gong Zhihui, Long Yican, et al. The oblique stereo image matching with Shi-Tomasi feature [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015 (1): 66-71. (in Chinese)
- [14] Krystian Mikolajczyk, Tinne Tuytelaars, Cordelia Schmid, et al. A comparison of affine region detectors [J]. *Proceedings of the International Journal of Computer Vision*, 2005, 65 (1): 43-72.
- [15] Vinay A, Vinay S S, Akshay K C, et al. Affine-scale invariant feature transform and two-dimensional principal component analysis: a novel framework for affine and scale invariant face recognition[J]. *Iet Computer Vision*, 2016, 10 (1): 43-59.