

文章编号: 1671-251X(2023)05-0066-08

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2022100002](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2022100002)

# 基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机 机载视频稳像算法

李成城<sup>1</sup>, 马立森<sup>1</sup>, 田原<sup>2,3</sup>, 贾运红<sup>2,3</sup>, 贾曲<sup>4</sup>, 田伟琴<sup>4</sup>, 张凯<sup>4</sup>

(1. 煤炭科学研究院, 北京 100013; 2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 山西 太原 030006;  
3. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室, 山西 太原 030006;  
4. 山西天地煤机装备有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:** 掘进机等煤机装备在行进或作业期间, 易因车体振动引起机载相机视频模糊, 导致基于机载视频的机器视觉检测精度和可靠性下降。针对该问题, 提出一种基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法。该算法由运动估计、轨迹平滑和运动补偿 3 个部分组成。在运动估计阶段, 先采用限制对比度自适应直方图均衡(CLAHE)算法对井下巷道图像进行增强处理, 再利用 Shi-Tomasi 算法获取每帧图像的特征点, 对获取的特征点进行光流追踪和匹配, 进而计算出相机的运动轨迹。在轨迹平滑阶段, 利用卡尔曼滤波, 根据视频前一帧的最优值预测当前时刻值, 避免均值滤波需预先存储采样数据的问题, 提高稳像的实时性。在运动补偿阶段, 根据原始运动路径和平滑路径的关系对抖动视频逐帧补偿, 生成稳定的视频序列。实验结果表明: ① 经 CLAHE 增强处理后, 特征点匹配成功率比未增强处理时提高了 58%, 比 HE 增强处理时提高了 43%, 说明 CLAHE 算法可有效提高图像特征点匹配数。② 通过像素偏移分析、差分图分析、峰值信噪比(PSNR)分析, 验证了基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法具有较好的稳像效果。③ 与传统的 HE+均值滤波算法相比, 基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的算法处理 100 帧视频图像的整体耗时减少了 0.379 s, 在去除抖动的同时, 有效提高了稳像的实时性。

**关键词:** 智能掘进; 掘进机; 机载视频稳像; 图像增强; 限制对比度自适应直方图均衡; 卡尔曼滤波

中图分类号: TD632 文献标志码: A

An onboard video stabilization algorithm for roadheader based on CLAHE and Kalman filter

LI Chengcheng<sup>1</sup>, MA Lisen<sup>1</sup>, TIAN Yuan<sup>2,3</sup>, JIA Yunhong<sup>2,3</sup>, JIA Qu<sup>4</sup>, TIAN Weiqin<sup>4</sup>, ZHANG Kai<sup>4</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Taiyuan Research Institute, Taiyuan 030006, China; 3. China National Engineering Laboratory for Coal Mining Machinery, Taiyuan 030006, China;  
4. Shanxi Tiandi Coal Mining Machinery Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** During the movement or operation of coal mining equipment such as a roadheader, the vibration of the vehicle body can easily cause blurring of the onboard camera video. This leads to a decrease in the precision and reliability of machine vision detection based on the onboard video. In order to solve the above problem, an onboard video stabilization algorithm for roadheader based on CLAHE and Kalman filter is proposed. This algorithm consists of three parts: motion estimation, trajectory smoothing, and motion compensation. In the motion estimation stage, the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) algorithm is used to enhance the image of the underground roadway. The Shi-Tomasi algorithm is used to obtain the feature points of each image frame. The obtained feature points are tracked and matched by optical flow, and then the motion

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2023-05-15; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1314002)。

作者简介: 李成城(1997—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为视频稳像, E-mail: 1718520210@qq.com。

引用格式: 李成城, 马立森, 田原, 等. 基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 66-73.

LI Chengcheng, MA Lisen, TIAN Yuan, et al. An onboard video stabilization algorithm for roadheader based on CLAHE and Kalman filter[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 66-73.



扫码移动阅读

trajectory of the camera is calculated. In the trajectory smoothing stage, Kalman filtering is used to predict the current time value based on the optimal value of the previous frame of the video. It avoids the problem of pre-storing sampling data of mean filtering and improves the real-time performance of image stabilization. In the motion compensation stage, the jitter video is compensated frame by frame based on the relationship between the original motion path and the smooth path, generating a stable video sequence. The experimental results show the following points: ① After CLAHE enhancement processing, the success rate of feature point matching is increased by 58% compared to the non-enhancement processing and 43% compared to the HE enhancement processing. It indicates that the CLAHE algorithm can effectively improve the matching number of image feature points. ② Through pixel offset analysis, differential image analysis, and peak signal-to-noise ratio (PSNR) analysis, it is verified that the onboard video stabilization algorithm for roadheader based on CLAHE and Kalman filter has a good image stabilization effect. ③ Compared with the traditional HE+mean filtering algorithm, the algorithm based on CLAHE and Kalman filter reduces the overall time consumption of processing 100 frames of video images by 0.379 seconds, effectively improving the real-time performance of the video stabilization while removing jitter.

**Key words:** intelligent excavation; roadheader; onboard video stabilization; image enhancement; contrast limited adaptive histogram equalization; Kalman filter

## 0 引言

远程智能掘进是实现少人甚至无人化掘进作业的根本目标,也是解决采掘失衡难题的基石<sup>[1]</sup>。机载视觉技术是掘进机的重要感知手段。掘进机等煤机装备在行进或作业期间,易因车体振动引起机载相机视频模糊,导致基于机载视频的机器视觉检测精度和可靠性下降。因此,掘进机机载视频稳像处理对于实现远程智能掘进具有重要的现实意义<sup>[2]</sup>。

近年来,对稳像技术的研究主要集中在机械稳像、光学稳像和电子稳像,与其他方法相比,电子稳像具有成本低和可移植性强的优点<sup>[3-4]</sup>。电子稳像一般可以分为运动估计、运动平滑、运动补偿3个部分。先通过运动估计算法获取全局运动矢量,再利用运动滤波去除运动矢量中的抖动分量,实现运动平滑,最后通过运动补偿算法对随机抖动矢量进行反向补偿,生成稳定的视频序列<sup>[5-6]</sup>。

目前,针对煤矿井下机载视频进行电子稳像的研究相对较少。文献[7]以矿用辅助运输车车载相机为研究对象,在稳像前对图像进行直方图均衡处理,提高了图像对比度,但直方图均衡是基于全局图像的均衡,对于图像中有明暗变化的区域均衡效果较差,难以提取图像中的有效特征点。文献[8-9]在稳像过程中利用均值滤波对运动轨迹进行平滑处理,去除运动轨迹中的抖动分量,但均值滤波是将连续采样的数据看作固定长度的队列,比较浪费运行内存,不适合应用于实时数据处理。针对上述问题,结合掘进机机载视频图像的特点,提出一种基于限

制对比度自适应直方图均衡(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法。在运动估计阶段对图像进行限制对比度的自适应增强,提高运动估计精度,然后结合卡尔曼滤波实现视频稳像。

## 1 算法流程

基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法由运动估计、轨迹平滑和运动补偿3个部分组成,其流程如图1所示。提高运动估计的准确度是提高稳像精度的关键,对运动轨迹数据的实时处理是提高稳像实时性的重要保证。

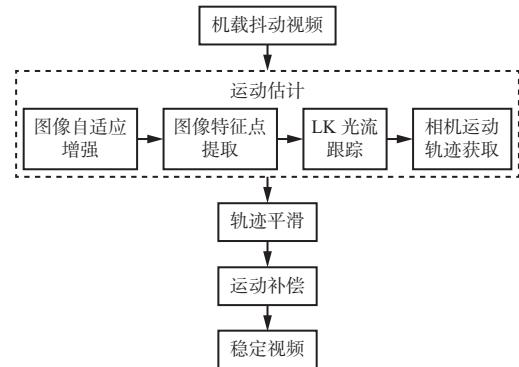


图1 基于 CLAHE 与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法流程

Fig. 1 Process of onboard video stabilization algorithm for roadheader based on contrast limited adaptive histogram equalization and Kalman filter

采用 CLAHE 算法对井下巷道图像进行增强处理,可在提高局部对比度的同时保留更多图像细节,有效提高图像中特征点的提取数量,进而提高运动

估计的精度。获取相机运动轨迹后, 利用卡尔曼滤波, 根据视频前一帧的最优值预测当前时刻值, 避免均值滤波需预先存储采样数据的问题, 提高稳像的实时性。根据原始运动路径和平滑路径的关系进行运动补偿, 生成稳定的视频序列。

## 2 基于图像增强的全局运动估计

为获取机载抖动视频的全局运动估计矢量, 先对视频序列进行限制对比度的自适应增强, 提高运动估计的精度; 再利用 Shi-Tomasi 算法获取每帧图像的特征点; 最后对获取的特征点进行光流追踪和匹配, 进而计算出相机的运动轨迹。

### 2.1 限制对比度的图像自适应增强

煤矿井下图像具有低照度、高粉尘、明暗不均的特点, 尤其是掘进过程中伴有大量粉尘, 导致图像模糊, 因此在稳像前需对图像进行增强处理<sup>[10]</sup>。直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)是一种经典的图像增强处理算法, 将原始图像的灰度直方图从较集中的某个灰度区间变成更广泛灰度范围内的分布, 但对于图像中有明显亮和暗的区域来说, 效果较差。与 HE 基于全幅图像均衡不同的是, 自适应直方图均衡化(Adaptive Histogram Equalization, AHE)是对局部图像的均衡, 对于明暗不均的图像, 可以有效提高图像的局部对比度, 获取更多图像细节, 但是自适应均衡后的图像易产生块状不连续和过度增强现象<sup>[11-13]</sup>。

CLAHE 算法在 AHE 的基础上对图像局部对比度进行限制<sup>[14]</sup>。对局部图像设定阈值, 超出阈值的部分平均分配到直方图的各个部分, 从而限制局部对比度的增强幅度, 防止因过度放大噪声而产生块状效应。CLAHE 算法的核心过程如下:

1) 将图像分为  $M \times N$ (实验中通常取  $8 \times 8$ )个不重叠且相互连续的子区域。

2) 计算每个子区域内的平均像素:

$$\bar{n} = \frac{n_x n_y}{n_{\text{gray}}} \quad (1)$$

式中:  $n_x$  为图像横轴( $x$  轴)方向的像素数;  $n_y$  为图像纵轴( $y$  轴)方向的像素数;  $n_{\text{gray}}$  为子区域灰度级的数量。

3) 对每个子区域重新分配像素, 截取像素值大于  $\beta \bar{n}$  ( $\beta$  为截取系数, 本文取 2.0) 的部分, 统计截取像素的总数, 并将其重新分配到直方图的各个灰度级上。直方图剪切与分配过程如图 2 所示。

4) 对裁剪后的区域进行 HE 处理, 并以均衡化后子块中心的像素值为参考点, 通过双线性插值方法计算并输出图像中各点的灰度值。

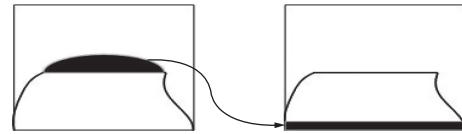
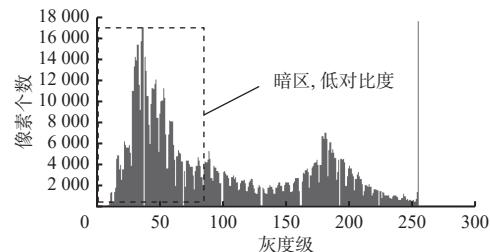


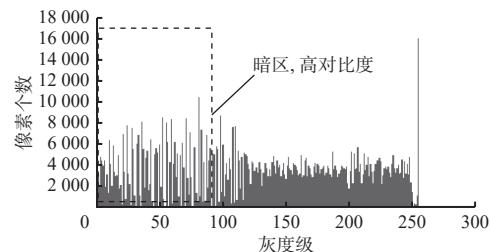
图 2 直方图剪切与分配过程

Fig. 2 Histogram cutting and allocation process

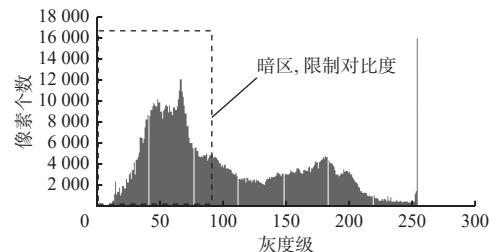
巷道图像增强前后对比如图 3 所示。可看出原始图像存在过亮或过暗区域, 图像灰度直方图主要分布于低灰度级和高灰度级区域。经 HE 增强的图像直方图整体分布更加均衡, 但对于灰度集中的过暗区域, 直方图被拉伸得比较稀疏, 导致对比度增强过大, 造成图像局部细节丢失。经 CLAHE 增强的图像在提高局部对比度的同时, 避免了因灰度聚集的过暗区域拉伸造成图像细节丢失的问题。



(a) 巷道原始图像灰度直方图



(b) 经 HE 增强处理后图像灰度直方图



(c) 经 CLAHE 增强处理后图像灰度直方图

图 3 巷道图像增强前后对比

Fig. 3 Comparison of roadway image before and after enhancement

### 2.2 图像特征点提取

图像中亮度变化剧烈或 2 条线交叉处的点通常被认为是特征点。利用 Shi-Tomasi 算法提取图像特征点, 其核心思想是通过移动固定尺寸的特征窗口, 寻找图像中灰度值变化明显的点<sup>[15]</sup>。

$$S(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y)[E(x+u, y+v) - E(x, y)]^2 \quad (2)$$

式中:  $S(u, v)$  为滑动窗口向各个方向移动时像素点衡

量系数的变化值;  $u, v$  为滑动窗口沿  $x$  和  $y$  方向的滑动变量;  $w(x, y)$  为加权函数;  $E(x, y)$  为  $(x, y)$  坐标下像素的灰度值。

为求出特征点位置, 对式(2)进行泰勒展开, 去除高阶项, 得

$$S(u, v) \approx [u \quad v] \sum_u \sum_v w(u, v) M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $M$  为特征点的梯度协方差矩阵。

假设  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为矩阵  $M$  的 2 个特征值, 设定一个阈值  $Y$  ( $Y$  为经验值, 本文取 0.01)。若图像中某处像素点满足  $\min(\lambda_1, \lambda_2) > Y$ , 则该位置存在特征点, 否则不存在。

巷道图像增强前后特征点提取对比如图 4 所示。可看出与图 4(a)相比, 图 4(b)因整体亮度提升, 导致图像细节模糊, 难以提取图像细节处特征点。图 4(c)提取到的特征点数量更多, 且更分散, 在提高图像局部对比度的同时, 还能获取更多图像细节。经 CLAHE 增强后的视频序列更有利于相邻帧间特征点的跟踪。

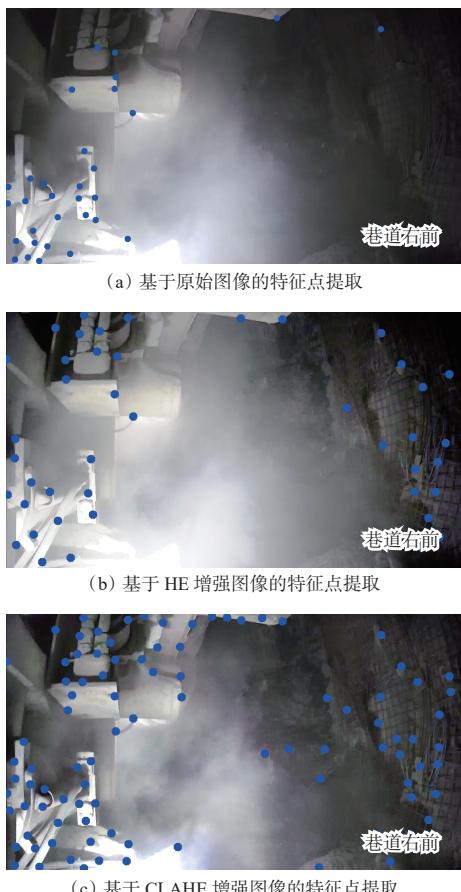


图 4 巷道图像增强前后特征点提取对比

Fig. 4 Comparison of feature point extraction before and after roadway image enhancement

### 2.3 LK 光流跟踪

在获取每帧图像的特征点后, 将具有较强鲁棒

性的 LK(Lucas-Kanade)光流法用于相邻帧间特征点的追踪与匹配。假设在时间间隔较小的情况下, 相邻帧之间亮度恒定且物体运动位置变化较小<sup>[16]</sup>。若相邻 2 帧图像的拍摄间隔为  $dt$ , 像素移动了  $(dx, dy)$ , 由于相邻帧图像像素灰度具有不变性, 则可得到图像的约束方程:

$$G(x, y, t) = G(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (4)$$

式中  $G(x, y, t)$  为  $t$  时刻坐标  $(x, y)$  处的灰度。

对式(4)进行泰勒展开并化简可得

$$I_x U + I_y V + I_t = 0 \quad (5)$$

式中:  $I_x, I_y$  分别为像素点在  $x$  方向和  $y$  方向的偏导数;  $U, V$  分别为像素点在  $x$  方向和  $y$  方向的速度;  $I_t$  为像素点对时间的偏导数。

式(5)中含有 2 个未知数, 无法直接解出像素点在 2 个方向的速度。因此以该运动像素点为中心, 假设其  $W \times W$  ( $W > 1$ ) 邻域内所有像素都具有相同的运动状态, 则有

$$\begin{bmatrix} I_{x_i} & I_{y_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = -I_{t_i} \quad (6)$$

式中:  $I_{x_i}, I_{y_i}$  分别为邻域内第  $i$  个像素点在  $x$  方向和  $y$  方向的偏导数,  $i=1, 2, \dots, W^2$ ;  $I_{t_i}$  为邻域内第  $i$  个像素点对时间的偏导数。

将  $W \times W$  邻域内像素点的运动状态联立, 利用最小二乘原理求解可得

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = -\left(A^T A\right)^{-1} A^T b \quad (7)$$

式中:  $A$  为邻域内像素点在  $x$  与  $y$  方向的偏导数;  $b$  为邻域内像素点对时间的偏导数。

根据求得的像素点速度, 可计算出经  $dt$  时间后像素点的位置  $(x + Udt, y + Vdt)$ , 进而可实现相邻帧间特征点的跟踪。基于 CLAHE 增强图像的特征跟踪如图 5 所示, 彩色圆点为跟踪的特征点, 圆点后方彩线为跟踪轨迹。



图 5 基于 CLAHE 增强图像的特征跟踪

Fig. 5 Feature tracking based on contrast limited adaptive histogram equalization enhanced image

### 2.4 机载相机运动轨迹获取

对相邻帧特征点进行匹配追踪后, 结合视频相

邻帧间的运动变换模型计算相机的运动轨迹。机载相机抖动的主要原因在于水平、垂直、旋转偏移的变化,选用仿射变换模型作为抖动视频相邻帧间的运动变换模型<sup>[17-18]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $(x_1, y_1)$  为参考帧特征点的坐标;  $\mathbf{H}$  为前后 2 帧特征点对应的仿射变换矩阵,  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & f_1 \\ a_3 & a_4 & f_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $a_1-a_4$  为相邻视频帧间的旋转参数,  $f_1, f_2$  分别为相邻视频帧在水平和垂直方向的平移量;  $(x_2, y_2)$  为当前帧追踪特征点的坐标。

设第  $k$  帧至第  $k+1$  帧的仿射变换矩阵为  $\mathbf{H}_k$ , 则第  $k$  帧图像对应的机载相机轨迹为

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{H}_{k-1} + \mathbf{H}_{k-2} + \cdots + \mathbf{H}_1 \quad (9)$$

### 3 运动平滑及补偿

#### 3.1 基于卡尔曼滤波的运动平滑

提取影响视频稳定的抖动分量进行反向补偿是实现电子稳像的核心过程, 电子稳像的目的是保留主动运动矢量, 去除随意抖动。主动运动矢量为低频运动, 随意抖动表现为高频运动, 根据二者的区别, 通过卡尔曼滤波器<sup>[19]</sup>对相机运动轨迹进行平滑处理。

与其他滤波方法相比, 卡尔曼滤波实时性强, 在运动平滑过程中使用前一帧运动参数预测的最优值和当前帧运动参数的测量值便可求得最优预测结果。基于卡尔曼滤波的运动平滑预测模型为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k^- = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \\ \hat{\mathbf{P}}_k^- = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{P}}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\hat{\mathbf{X}}_k^-$  为先验估计值, 根据第  $k-1$  帧预测的最优估计值预测第  $k$  帧的结果;  $\mathbf{F}_k$  为状态转移矩阵;  $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$  为后验估计值;  $\hat{\mathbf{P}}_k^-$  为第  $k$  帧的先验估计协方差, 是对预测状态的不确定性度量;  $\hat{\mathbf{P}}_{k-1}$  为后验估计协方差;  $\mathbf{Q}_k$  为过程噪声协方差矩阵。

卡尔曼滤波的更新模型为

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \hat{\mathbf{P}}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\bar{\mathbf{Z}}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k^-) \\ \mathbf{P}_k = \hat{\mathbf{P}}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_k^- \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $K_k$  为第  $k$  帧的卡尔曼增益;  $\mathbf{H}_k$  为观测矩阵;  $\mathbf{R}_k$  为观测噪声的协方差矩阵;  $\bar{\mathbf{Z}}_k$  为系统测量值。

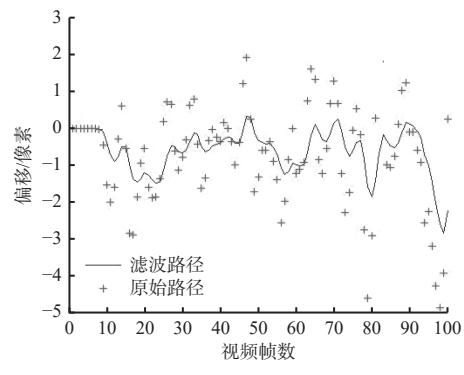
抖动视频运动轨迹经卡尔曼滤波器的预测和更新后, 去除抖动的高频分量, 得到一条平滑的运动轨

迹, 滤波后轨迹的变化反映了相机原始路径的变化。滤波前后抖动视频中像素点在水平和垂直方向的方差见表 1, 运动轨迹如图 6 所示。与原始轨迹相比, 滤波后的方差小于滤波前, 运动轨迹离散度变得很小, 轨迹曲线更加平滑。曲线越平滑, 说明滤波后视频序列越稳定。

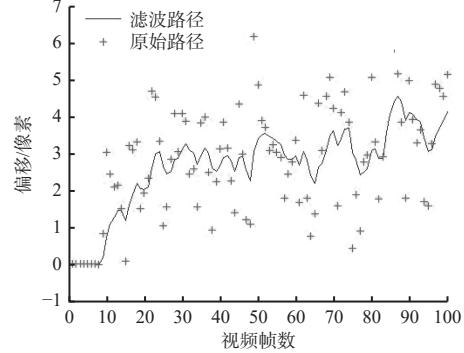
表 1 滤波前后方差

Table 1 Variance before and after filtering

方向	滤波前方差	滤波后方差
水平	1.121	0.23
垂直	2.820	1.79



(a) 像素点的水平运动轨迹



(b) 像素点的垂直运动轨迹

图 6 像素点水平及垂直方向运动轨迹

Fig. 6 Horizontal and vertical motion trajectories of pixel points

#### 3.2 运动补偿

运动轨迹经过卡尔曼滤波后, 去除了视频中的随意抖动, 得到基于主观运动的平滑运动矢量  $\mathbf{O}_s$ , 视频的原始运动矢量  $\mathbf{O}$  中包含主观运动矢量和抖动矢量, 对  $\mathbf{O}$  和  $\mathbf{O}_s$  作差可求得相邻帧之间的抖动补偿量  $\Delta \mathbf{O}$ , 将其补偿到原始运动轨迹中即可生成稳定的视频序列。

$$\Delta \mathbf{O} = \mathbf{O} - \mathbf{O}_s \quad (12)$$

### 4 实验分析

采用掘进机机载摄像系统采集视频序列, 结合 OpenCV 和 VSCode 编程工具对原始抖动视频进行

处理,验证掘进机机载视频稳像算法性能。计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU@2.30 GHz。

#### 4.1 全局特征点匹配分析

选取掘进机机载视频中的 100 帧图像,对相邻特征点匹配情况进行分析,结果如图 7 所示。分析可知,原始图像的平均特征点匹配数为 56.25,经 HE 增强处理后图像的平均特征点匹配数为 59.7,经 CLAHE 增强处理后图像的平均特征点匹配数为 85.1。经 CLAHE 增强处理后,特征点匹配成功率比未增强处理时提高了 58%,比 HE 增强处理时提高了 43%,说明基于 CLAHE 的图像增强算法可有效提高图像特征点匹配数,更适用于掘进机机载视频稳像处理。

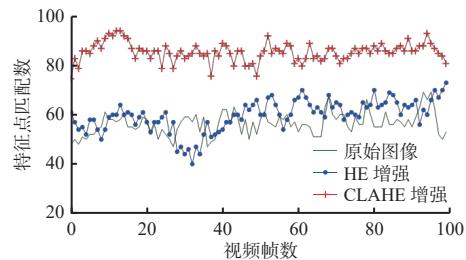


图 7 相邻帧特征点匹配结果

Fig. 7 Matching results of adjacent frame feature points

#### 4.2 算法有效性分析

##### 4.2.1 像素偏移分析

经稳像处理后,相邻帧图像像素之间的偏移量越小,说明稳像效果越好<sup>[20]</sup>。稳像前后掘进机机载视频在水平方向的像素偏移对比情况如图 8 所示。分析可知,稳像前水平方向像素偏移均值为 3.93,采用 HE+均值滤波算法稳像后水平方向像素偏移均值为 0.26,采用本文算法稳像后水平方向像素偏移均值为 0.05。图像经本文算法处理后像素偏移量最小,与稳像前相比,水平方向偏移均值减少了 3.88,与 HE+均值滤波算法相比,水平方向偏移均值减少了 0.21。

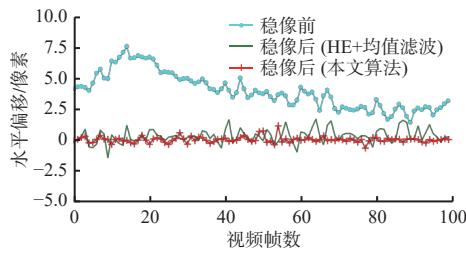


图 8 稳像前后水平方向偏移对比

Fig. 8 Comparison of horizontal deviation before and after image stabilization

图像经过 CLAHE 增强处理后,克服了稳像过程中因为掘进工作面图像光照明暗变化导致难以提取

有效特征点的问题,进而提高了抖动视频中像素点运动偏移补偿的精度,最终实现视频稳像。

##### 4.2.2 差分图分析

稳像前后相邻帧间的差分图也可用来评价稳像算法的有效性。将相邻 2 帧图像相减,即可得到差分图。相邻 2 帧图像的差分图信息越少,说明相邻图像越相似,稳像效果越好。经本文算法稳像处理前后的差分图如图 9 所示。经统计,稳像后差分图含有的信息较稳像前降低了 39%,说明本文算法具有良好的稳像效果。

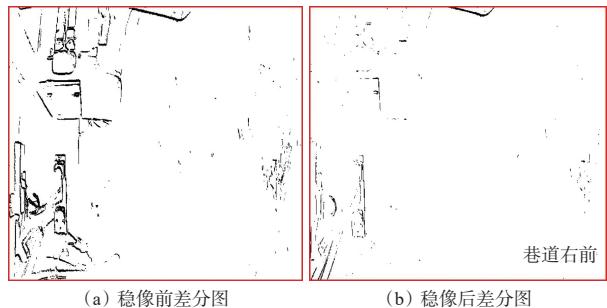


图 9 稳像前后差分图

Fig. 9 Difference map before and after image stabilization

##### 4.2.3 峰值信噪比分析

相邻 2 帧图像间的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)也是用来客观评价视频稳像效果的有效方法<sup>[21-22]</sup>。将相邻 2 帧图像的像素进行逐行对比,相似程度越高,则 PSNR 越大,视频稳像效果越好。稳像前后 PSNR 对比如图 10 所示。分析可知,稳像前 PSNR 均值为 35.58 dB,采用 HE+均值滤波算法稳像后 PSNR 均值为 36.57 dB,采用本文算法稳像后 PSNR 均值为 39.18 dB。经本文算法稳像处理后,与稳像前相比,PSNR 均值提高了 10%;与 HE+均值滤波算法相比,PSNR 均值提高了 7%。实验结果验证了本文算法对井下掘进机机载抖动视频具有较好的稳像效果。

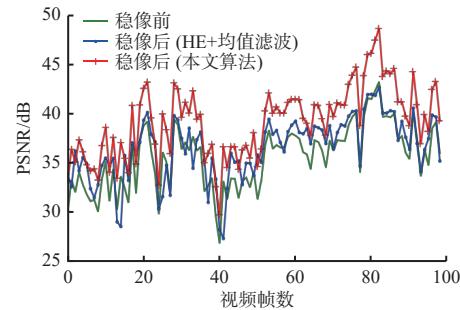


图 10 稳像前后 PSNR 值对比

Fig. 10 Comparison of PSNR values before and after image stabilization

#### 4.3 算法耗时分析

采用 HE+均值滤波算法和本文算法对测试的

100 帧视频序列进行稳像处理,统计算法各阶段的耗时情况,结果见表 2。与 HE+均值滤波算法相比,本文算法在运动估计阶段的耗时降低了 17%,运动平滑阶段的耗时降低了 33%,算法整体运行时间降低了 10%。实验结果表明,在运动估计阶段,自适应图像增强算法提高了图像特征点提取的速度,降低了运动估计阶段的耗时。在运动平滑阶段,卡尔曼滤波根据视频前一帧的最优值预测当前时刻值,避免了均值滤波需预先存储采样数据的问题,减少了运动平滑阶段的耗时,进而提高了稳像的实时性。

表 2 各算法耗时

Table 2 Time consuming of each algorithm

算法	运动估计耗时	运动平滑耗时	相关计算耗时	整体耗时
HE+均值滤波	2.340	0.003	1.286	3.629
本文算法	1.938	0.002	1.310	3.250

## 5 结论

1) 在运动估计阶段,通过限制对比度的图像自适应增强算法动态提高图像的局部对比度,提高了相邻帧间运动估计的精度。经实验验证,与原始视频相比,图像自适应增强后特征匹配成功率提高了 58%。

2) 在运动平滑与补偿阶段,通过卡尔曼滤波对获取的运动轨迹进行平滑处理,与 HE+均值滤波算法相比,100 帧视频图像处理的整体耗时减少了 0.379 s,在去除抖动的同时,有效提高了稳像的实时性。

3) 由于抖动视频帧运动补偿过程中会发生旋转和偏移,造成视频帧边缘部分像素丢失,呈现出黑色区域,即“黑边”。如何对“黑边”区域进行修复,获取完整的图像输出,是今后研究的一个方向。

## 参考文献(References):

- [1] 张旭辉, 杨文娟, 薛旭升, 等. 煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 579-597.  
ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, XUE Xusheng, et al. Challenges and developing of the intelligent remote control on roadheaders in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 579-597.
- [2] WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(2): 19-35.
- [3] 魏闪闪, 谢巍, 贺志强. 数字视频稳像技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(9): 2044-2058.
- [4] 熊炜, 王传胜, 李利荣, 等. 结合光流法和卡尔曼滤波的视频稳像算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(3): 493-499.  
XIONG Wei, WANG Chuansheng, LI Lirong, et al. Video stabilization algorithm based on optical flow method and Kalman filtering[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(3): 493-499.
- [5] 熊炜, 王传胜, 管来福, 等. 基于特征跟踪和网格路径运动的视频稳像算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(5): 843-850.  
XIONG Wei, WANG Chuansheng, GUAN Laifu, et al. A video stabilization algorithm based on feature tracking and mesh path motion[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(5): 843-850.
- [6] 朱娟娟, 范静, 郭宝龙. 抗前景干扰的自适应电子稳像算法[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 45-52.  
ZHU Juanjuan, FAN Jing, GUO Baolong. Adaptive electronic image stabilization algorithm resistant to foreground moving object[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(6): 45-52.
- [7] 范叶平, 郭政, 张锐. 基于下采样灰度投影的电子稳像算法研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4): 22-27.  
FAN Yeping, GUO Zheng, ZHANG Rui. Research on electronic image stabilization algorithm based on subsample gray-scale projection[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4): 22-27.
- [8] 王施鳗, 许文海, 董丽丽, 等. 基于改进的 Harris 角点的机载红外图像电子稳像[J]. 红外技术, 2020, 42(6): 573-579.  
WANG Shiman, XU Wenhai, DONG Lili, et al. Electronic image stabilization of airborne infrared images based on improved Harris corner detection[J]. Infrared Technology, 2020, 42(6): 573-579.
- [9] 程德强, 郭政, 刘洁, 等. 一种基于改进光流法的电子稳像算法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 707-712.  
CHENG Deqiang, GUO Zheng, LIU Jie, et al. An electronic image stabilization algorithm based on improved optical flow method[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 707-712.
- [10] 孙继平, 田子建. 矿井图像监视系统与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 65-68.  
SUN Jiping, TIAN Zijian. Image monitoring system and key technology in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 65-68.
- [11] 王诚聪, 刘亚静. 矿井复杂环境视频监控图像增强算法研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(4): 147-151.  
WANG Chengcong, LIU Yajing. Image enhancement algorithm for video surveillance in complex environment

- of underground mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(4): 147-151.
- [12] 王殿伟, 王晶, 许志杰, 等. 一种光照不均匀图像的自适应校正算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(6): 1383-1390.
- WANG Dianwei, WANG Jing, XU Zhijie, et al. Adaptive correction algorithm for non-uniform illumination images[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(6): 1383-1390.
- [13] 余成波, 孔庆达, 田桐. 基于 CLAHE 与同态滤波的细胞图像增强新方法[J]. *微型机与应用*, 2017, 36(4): 51-52, 62.
- YU Chengbo, KONG Qingda, TIAN Tong. New approach to the cell image enhancement based on adaptive histogram equalization and homomorphic filtering[J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2017, 36(4): 51-52, 62.
- [14] YADAV G, MAHESHWARI S, AGARWAL A. Contrastlimited adaptive histogram equalization based enhancement for real time video system[C]. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, Delhi, 2014: 2392-2397.
- [15] BANSAL M, KUMAR M, KUMAR K, et al. An efficient technique for object recognition using Shi-Tomasi corner detection algorithm[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(6): 4423-4432.
- [16] WANG Zhen, YANG Xiaojun. Moving target detection and tracking based on pyramid Lucas-Kanade optical flow[C]. The 3rd IEEE International Conference on
- (上接第 45 页)
- [16] 温国锋, 陈立文. 煤矿安全管理数据仓库的建立与应用研究[J]. *中国矿业*, 2009, 18(1): 95-97.
- WEN Guofeng, CHEN Liwen. On building and application of coal mine security management data warehouse[J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(1): 95-97.
- [17] 赵随海. 铁路列车调度指挥系统数据仓库体系结构的研究[J]. *铁道运输与经济*, 2018, 40(12): 55-59.
- ZHAO Suihai. A study on the architecture of data warehouse for the railway train dispatching command system[J]. *Railway Transport and Economy*, 2018, 40(12): 55-59.
- [18] 王霖, 方乾, 张晓霞, 等. 智能化煤矿数据仓库建模方法[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 5-13.
- WANG Lin, FANG Qian, ZHANG Xiaoxia, et al. Intelligent coal mine data warehouse modeling method[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 5-13.
- [19] 曾志浩, 姚贝, 张琼林, 等. 基于 Hadoop 平台的用户行 Image, Vision and Computing, Chongqing, 2018: 66-69.
- [17] RODRÍGUEZ-PADILLA I, CASTELLE B, MARIEU V, et al. A simple and efficient image stabilization method for coastal monitoring video systems[J]. *Remote Sensing*, 2019, 12(1): 1-21.
- [18] ZHAI Bo, ZHENG Jin, LI Bo. Digital image stabilization based on adaptive motion filtering with feedback correction[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75: 12173-12200.
- [19] LI Lengyi, MA Xiaohong, ZHAO Zheng. Real-time video stabilization based on fast block matching and improved Kalman filter[C]. The Fifth International Conference on Intelligent Control and Information Processing, Dalian, 2014: 394-397.
- [20] 程德强, 黄晓丽, 厉航, 等. 矿井车载视频图像稳像算法研究[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(11): 21-26.
- CHENG Deqiang, HUANG Xiaoli, LI Hang, et al. Research on vehicle video image stabilization algorithm for mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(11): 21-26.
- [21] SOUZA M R E, MAIA H D A, PEDRINI H. Survey on digital video stabilization: concepts, methods, and challenges[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(3): 1-37.
- [22] 陈滨, 赵建军, 杨利斌. 视频稳像评价方法研究[J]. *科学与技术与工程*, 2016, 16(22): 219-224, 230.
- CHEN Bin, ZHAO Jianjun, YANG Libin. Research on evaluation method of video stabilization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(22): 219-224, 230.
- 为挖掘[J]. *计算技术与自动化*, 2015, 34(2): 100-103.
- ZENG Zhihao, YAO Bei, ZHANG Qionglin, et al. User behavior mining based on Hadoop platform[J]. *Computing Technology and Automation*, 2015, 34(2): 100-103.
- [20] 马宏伟, 吴少杰, 曹现刚, 等. 煤矿综采设备运行状态大数据清洗建模[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(11): 80-83.
- MA Hongwei, WU Shaojie, CAO Xiangang, et al. Big data cleaning modeling of operation status of coal mine fully-mechanized coal mining equipment[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(11): 80-83.
- [21] 张晓霞, 陈思宇, 苏上海, 等. 矿井智能一体化管控平台设计及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 168-178.
- ZHANG Xiaoxia, CHEN Siyu, SU Shanghai, et al. Design and application of mine intelligent integrated management and control platform[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 168-178.