

高瑞,苗长云,苗笛,等. 输送带故障检测多视点图像自适应增强方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 594-602. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1186

GAO Rui, MIAO Changyun, MIAO Di, et al. Multi-view image adaptive enhancement method for conveyor belt fault detection[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 594-602. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1186

## 输送带故障检测多视点图像自适应增强方法

高 瑞<sup>1,2</sup>, 苗长云<sup>1,3</sup>, 苗 笛<sup>4</sup>, 李现国<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2. 天津城建大学 控制与机械工程学院, 天津 300384; 3. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 4. 天津职业技术师范大学 电子工程学院, 天津 300222)

**摘 要:**为提高矿用输送带故障检测的准确性,针对输送带故障检测采集的图像存在光照不均、图像质量差、影响故障检测与识别的问题,提出输送带故障检测多视点图像自适应增强方法。采用具有尺度自适应功能的多尺度 Retinex 法对图像光照分量进行提取,再根据提取的光照分量,利用针对多视点线阵相机采集图像特性改进的自适应伽马函数,完成对多视点图像的非均匀光照校正,最后进行图像细节对比度的增强。实验结果表明:该方法可去除非均匀光照、井下恶劣环境等对图像质量的影响,使不同视点不同光照环境条件下线阵相机采集图像的平均亮度具有一致性,压缩图像动态范围,提高对比度,使得图像中阴暗区域的细节更加明显,提高故障检测准确性,适合于矿用输送带故障在线检测。

**关键词:**输送带;故障检测;非均匀光照;图像增强;机器视觉

**中图分类号:**TD528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)S2-0594-09

## Multi-view image adaptive enhancement method for conveyor belt fault detection

GAO Rui<sup>1,2</sup>, MIAO Changyun<sup>1,3</sup>, MIAO Di<sup>4</sup>, LI Xianguo<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 4. School of Electronics Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The images collected to detect the fault of conveyor belt have some problems of non-uniform illumination, and poor image quality. It makes fault detection and recognition become difficult. In order to improve the accuracy of fault detection of mine conveyor belt, a method for adaptive enhancement of multi-view images has been proposed in this paper. Firstly, a multi-scale Retinex method with scale adaptive is used to extract the illumination components of an image. According to the extracted illumination component, the non-uniform illumination correction of multi-view images is achieved by using the adaptive gamma function. Finally, the image contrast is enhanced. The experimental results show that this method has many effects, such as removing the effect of non-uniform illumination and coal mine harsh environments, making the average intensity of the image collected by the linear array camera under different viewpoints and illumination conditions consistent, compressing the image dynamic range, improving the image contrast, making the detail of dark area more obvious in the image. This method contributes to improve the accuracy of fault detection, and is suitable for the on-line fault detection of mine conveyor belts.

**Key words:** conveyor belt; fault detection; non-uniform illumination; image enhancement; machine vision

收稿日期:2017-08-29 修回日期:2017-10-20 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274150,51504164);天津市自然科学基金重点资助项目(17JCZDJC31600)

作者简介:高 瑞(1984—),男,山东章丘人,讲师,博士研究生。E-mail:gaorui223@126.com

由于输送带长期在恶劣环境下使用,带式输送机的安装调试不当,被废弃物或障碍物划伤,尖锐物体落入输送带,转载点处落料位置不正造成的负载不均匀等原因,输送带易产生跑偏、表面损伤和纵向撕裂等故障,如不及时检测和处理,会造成设备损坏、物料损耗、安全事故,产生巨大经济损失,人员伤亡,影响安全生产。项目组采用基于机器视觉的技术研制一种矿用输送带故障在线检测系统,能够实现输送带跑偏、表面损伤和纵向撕裂故障的在线检测<sup>[1-3]</sup>。在基于机器视觉的矿用输送带故障在线检测中,由于图像采集系统中的照明光源和线阵相机安装空间受限于输送机结构,为了满足输送带检测的要求,需要采用多个线阵相机,分别安装在不同位置,以多视点的方式从不同角度同时获取多幅图像,才能实现输送带图像的无死角覆盖。由于现场环境存在黑暗、多尘、高温等不利条件,且存在输送带表面几何形状为弧形、光源发光差异、光源摆放位置调整不准等因素,导致输送带表面光照不均,使各线阵相机采集到的多视点图像亮度明暗不均、对比度较差,故需进行增强处理,以满足矿用输送带故障检测的要求。

现有可对图像增强的方法较多,例如有直方图均衡法、灰度变换法、形态学法、同态滤波法、Retinex 法等,但是这些方法都只针对特定情况下的图像有较好的增强效果,且均存在一定的不足,如:直方图均衡法会出现处理后的图像亮度过增强,丢失图像的细节信息,甚至改变图像的原貌;灰度变换法很难得到比较理想的变换函数;形态学法虽可以改善图像的效果,但也会改变图像的自然特征;同态滤波法和 Retinex 法对于亮度不足、模糊的图像有着显著的增强效果,但是易出现边缘光晕现象,且存在细节信息丢失和效率低等不足。在现有的图像增强方法中,由于 Retinex 法可以提取到光照分量,图像增强效果相对较好,具有一定的优势,目前在对 Retinex 法的改进研究较多且取得了一定的成果,如:张凌云等采用 Butterworth 低通滤波器噪声滤波和 Retinex 法相结合实现了对 X 光钢丝绳芯输送带图像的增强<sup>[4]</sup>;赵晓霞等对多尺度 Retinex 法进行改进,对 Retinex 输出采用自适应空间变化增强,具有较好的图像去雾效果<sup>[5]</sup>;方帅等在基于小波变换域图像融合策略的基础上,提出基于图像引导滤波的多尺度 Retinex 法,实现图像细节增强与颜色保真<sup>[6]</sup>;王龙志等采用权重自适应调节的多尺度 Retinex 法,实现了光学相干层析图像衰减的补偿<sup>[7]</sup>;LEE S、刘志成和王殿伟等分别利用多尺度高斯函数或引导滤波法对光照分量进行提取,然后利用二维伽马函数对光照不均匀图像进行校

正<sup>[8-11]</sup>。这些改进方法对如面阵相机拍摄的彩色图像、X 光图像、光学相干层析图像等特定图像的增强取得了较好的效果,但由于图像的增强与拍摄物体的特性、环境和后续处理的要求等因素密切相关,具有很强的针对性,目前的图像增强方法并不适用于矿用输送带故障检测。矿用输送带故障检测需要一种有效的图像增强方法,在能够进行非均匀光照的均匀化校正、提高图像中较暗区域的细节信息的同时,又能提高图像对比度,还要有较快的处理速度,以适应在线故障识别和诊断的要求<sup>[12-17]</sup>。需要根据矿用输送带故障检测的特殊性,进行多视点图像自适应增强方法的研究。

针对输送带故障检测采用多视点线阵相机进行图像采集的特点,本文在以往 Retinex 法研究的基础上进行改进,提出输送带多视点图像自适应增强方法。采用具有尺度自适应功能的多尺度 Retinex 法对光照分量进行提取,再根据提取的光照分量进行非均匀光照的校正,校正利用针对多视点线阵相机采集图像特性改进的自适应伽马函数作用于各线阵相机各帧图像完成,最后进行图像细节对比度的增强。

## 1 输送带故障在线检测系统

基于机器视觉的输送带故障在线检测系统装置是由线阵 CCD 网络相机、线形光源、以太网交换机和计算机等组成,系统组成示意,如图 1 所示。

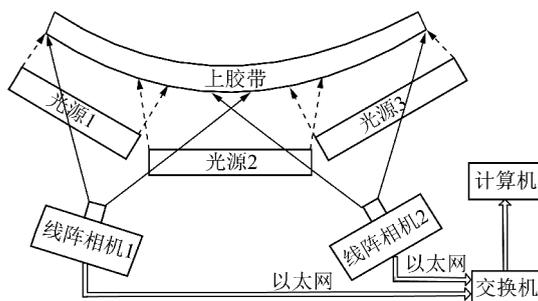


图 1 输送带故障在线检测系统示意

Fig. 1 Framework of conveyor belt fault on-line detection system

该装置工作过程是通过高亮度的线形光源发射光线照射在输送带表面时产生漫反射光,漫反射光的光强与输送带表面特性有关;线阵 CCD 相机通过线扫描感应漫反射光,每次扫描采集与输送带运行方向垂直的一行图像,并通过以太网传输给计算机;计算机对输送带运行图像通过图像预处理、图像分割、故障特征提取等处理,分析和识别输送带跑偏、表面损伤和纵向撕裂等故障,发现故障时给出故障报警或停机控制信号。此外还有采用喷水和吹风方式进行相机镜头现场除尘的辅助设备,以减少粉尘的影响。输

送机的结构特点限制了检测系统中相机和光源的安装空间,为了使采集图像能覆盖整个输送带表面,需要采用多个线阵相机,通过安装在不同位置,以多视点的方式从不同角度同时获取图像,如要采集输送带上胶带下表面图像进行故障检测,相机和光源只能安装在上下两胶带之间离输送带上胶带下表面很近的狭小空间,间距小于40 cm,如图2所示,这样严重制约机器视觉系统的成像效果,且输送带表面几何形状为弧形,为了增强光照均匀,系统采用多个线形LED光源分段贴近并沿输送带表面呈弧形布置,但由于各段LED光源存在发光差异且安装位置调整不准,以及现场复杂环境等因素使各视点线阵相机采集的图像存在光照不均、图像质量差、影响故障检测,易造成故障的漏检或误检。



(a) 实验室



(b) 现场

图2 上胶带图像采集装置在输送机上安装位置

Fig. 2 Installation position of image acquisition device for upper belt on the conveyor

## 2 多视点图像自适应非均匀光照校正

考虑到线阵相机图像采集的特点,每次采集与输送带运行方向垂直的输送带上固定空间范围的一帧(行)图像,一幅图像是由各次采集的帧(行)图像拼接而成,如 $2\ 048 \times 2\ 048$ 图像是由像元个数为2 048的线阵相机连续采集2 048帧(行)图像拼接而成的。输送带故障检测系统中多视点采用多个线阵相机采集,同一线阵相机各帧(行)图像具有相同的光照分布情况,且保持不变,而不同线阵相机之间各帧(行)图像具有不同的光照分布情况,本文首先采用自适应多尺度Retinex法对线阵相机采集的某一整幅图像(如 $2\ 048 \times 2\ 048$ 图像)进行光照分量的提

取,然后利用提取的光照分量对线阵相机各帧(行)图像光照分布进行估计,此线阵相机帧(行)光照分量经一次估计可反复使用,最后利用改进自适应伽马函数完成实时采集的多视点图像非均匀光照的校正。

### 2.1 自适应多尺度Retinex法光照分量的提取

Retinex方法是模仿人类视觉系统发展而来,基于图像的光照度-反射分量模型,将图像 $f(x,y)$ 视为入射分量 $i(x,y)$ 和反射分量 $r(x,y)$ 的乘积:

$$f(x,y) = i(x,y) \times r(x,y) \quad (1)$$

光照情况体现在入射分量中,也称光照分量,均匀缓慢变化,反射分量则主要反映了图像的细节特性。Retinex法通过空域滤波和平滑卷积处理函数对图像进行全局平滑卷积处理,处理后的结果即为图像的光照分量 $L(x,y)$ 计算公式为

$$L(x,y) = i(x,y) = f(x,y) * g(x,y) \quad (2)$$

其中,\*表示卷积运算; $f(x,y)$ 为原始输入图像; $g(x,y)$ 为滤波和平滑卷积处理函数,一般为高斯函数,表达式为

$$g(x,y) = K \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2] \quad (3)$$

式中, $\sigma$ 为高斯函数的尺度常数; $K$ 为归一化常数,使得函数满足: $\iint g(x,y) dx dy = 1$ 。

根据高斯函数尺度 $\sigma$ 数量,Retinex法还可以分为单尺度Retinex(SSR)和多尺度Retinex(MSR),多尺度Retinex法是将多个单尺度Retinex的处理结果进行加权平均,以提取更加合理的光照分量。多尺度Retinex法按照下式完成图像的光照分量 $L_{MSR}(x,y)$ 的提取:

$$L_{MSR}(x,y) = \sum_{n=1}^N \omega_n [f(x,y) * g_n(x,y)] \quad (4)$$

$$g_n(x,y) = K \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma_n^2] \quad (5)$$

式中, $f(x,y)$ 为原始输入图像; $g_n(x,y)$ 为尺度为 $\sigma_n$ 的高斯环绕函数; $N$ 为尺度的数量; $\omega_n$ 为第 $n$ 个尺度的加权系数,满足 $\sum_{n=1}^N \omega_n = 1$ 。

多尺度Retinex法中的两个参数——高斯函数的尺度 $\sigma_n$ 和尺度的加权系数 $\omega_n$ 值的选取,直接影响图像增强的效果。尺度 $\sigma_n$ 的大小决定了卷积核的作用范围,尺度 $\sigma_n$ 越小,动态范围压缩越大,图像的局部细节较突出,尺度 $\sigma_n$ 越大,图像的整体效果越好,但局部细节不清晰。实验表明对于大多数图像而言,通常选取大、中、小3个尺度,如选用20,100,250。对于尺度个数 $N=3$ 的多尺度Retinex,每个尺度的加权系数一般选取同一固定值为 $\omega_n = 1/3$ 。但由于图像本身的特点,选取同一固定的尺度加权系数很难达到

较好效果,无法满足精确提取光照分量的要求,需要对多尺度 Retinex 法进行改进。对于输送带图像来说,小尺度光照分量图像含有较多输送带本身的纹理细节和边缘信息,图像一致性差;大尺度光照分量图像具有很好的图像一致性,缺少边缘信息。在选取权重系数时要综合考虑各单尺度光照分量图像间作用的比较关系,使提取出的光照分量图像能准确的反映场景中的光照信息,又能较好的保持原图像的边缘特征,通过加权系数的自适应选取,以增强图像处理效果。首先分别求出 3 个不同单尺度高斯函数卷积作用下图像的光照分量图,然后从 3 个光照分量图像中分别选取两个图像,求两两图像相同坐标像素差值的绝对值,然后计算所有差值绝对值的均值,计算公式如下:

$$\begin{cases} L_1(x, y) = f(x, y) * g_1(x, y) \\ L_2(x, y) = f(x, y) * g_2(x, y) \\ L_3(x, y) = f(x, y) * g_3(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} d_{12} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{|L_1(x, y) - L_2(x, y)|}{m \times n} \\ d_{23} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{|L_2(x, y) - L_3(x, y)|}{m \times n} \\ d_{13} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{|L_1(x, y) - L_3(x, y)|}{m \times n} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $L_1(x, y)$ ,  $L_2(x, y)$ ,  $L_3(x, y)$  分别为 3 个不同单

尺度高斯函数卷积作用得到的 3 个光照分量图像;  $d_{12}$ ,  $d_{23}$ ,  $d_{13}$  分别为两两图像相同坐标像素的差值绝对值的均值。

通过比较  $d_{12}$ ,  $d_{23}$ ,  $d_{13}$  值确定各尺度的权重, 3 个尺度的自适应权重系数  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  的计算公式为

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{d_{23}}{d_{12} + d_{23} + d_{13}} \\ \omega_2 = \frac{d_{13}}{d_{12} + d_{23} + d_{13}} \\ \omega_3 = \frac{d_{12}}{d_{12} + d_{23} + d_{13}} \end{cases} \quad (8)$$

采用自适应多尺度 Retinex 法提取的光照分量计算公式为

$$L_{MSR}(x, y) = \omega_1 \times L_1(x, y) + \omega_2 \times L_2(x, y) + \omega_3 \times L_3(x, y) \quad (9)$$

自适应多尺度 Retinex 法提取的各光照分量图像比较,如图 3 所示。图 3(b)~(d)分别为选取 20, 100, 250 这 3 个尺度值得到的单尺度光照分量图,由图 3 可知小尺度  $\sigma=20$  的光照分量图像含有较多输送带边缘信息,大尺度  $\sigma=250$  光照分量图像一致性较好,图 3(e), (f) 分别为采用固定权重值  $\omega_n=1/3$  和本文方法提取的得到的光照分量,本文方法相比采用固定权重值方法提取的得到的光照分量更能反映图像的光照分布和输送带边缘信息。

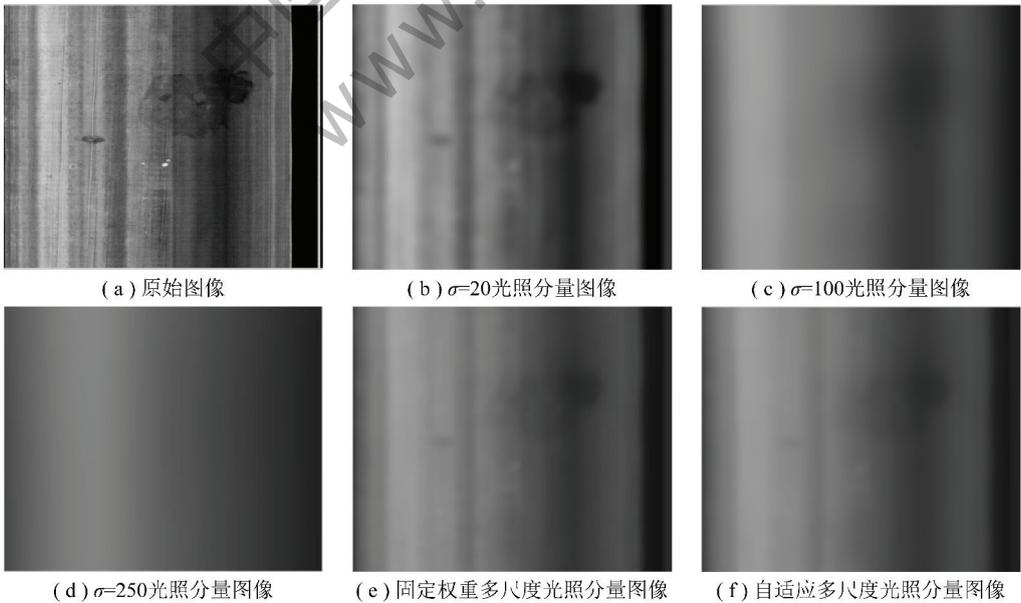


图 3 提取的各光照分量图像比较

Fig. 3 Comparison of the extracted illumination component images

## 2.2 线阵相机光照分布估计

对各线阵相机采集的输送带图像的帧(行)光照度分布情况进行估计,取像素个数为  $n$  的线阵相机采

集连续多帧(行)图像,使这些图像正好可分成连续的  $N$  幅  $m \times n$  大小的图像,对这  $N$  幅图像利用自适应多尺度 Retinex 法提取出各幅图像的光照分量,得

到光照分量图为  $L_{MSRi}(x, y), i=1, \dots, N$ , 然后求所有光照分量图的各列像素的列均值  $b_j$ , 计算公式如下:

$$b_j = \sum_{i=1}^N \sum_{x=1}^m \frac{L_{MSRi}(x, y)}{m} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

以列均值  $b_j$  表示线阵相机帧(行)光照度分布情况, 即线阵相机帧(行)光照分量  $L(j)$  为

$$L(j) = b_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

进而可求得线阵相机帧(行)光照分量均值  $\bar{L}$  为

$$\bar{L} = \sum_{j=1}^n \frac{L(j)}{n} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

对图 3(f) 这个采用自适应多尺度 Retinex 法提取出的光照分量, 进行线阵相机出的光照分布的估计, 按照式(10)~(12)计算线阵相机帧(行)光照分量及其均值曲线, 如图 4 所示, 该曲线反映了线阵相机帧(行)图像光照分量分布情况。

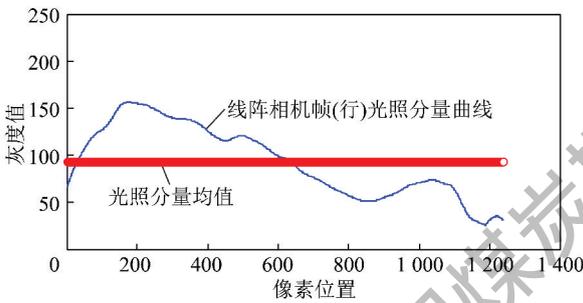


图 4 线阵相机帧(行)图像光照分量及均值曲线

Fig. 4 Illumination component and mean curve of frame (line) image obtained by linear array camera

### 2.3 改进自适应伽马函数非均匀光照校正

同一线阵相机各帧(行)图像具有相同的光照分布情况, 提取线阵相机帧(行)光照分量后, 需要在输送带检测中根据光照度分布情况对线阵相机实时采集的帧(行)图像进行非均匀光照在线校正, 增加光照较低像素的亮度值, 减小光照较强像素亮度值, 使光照均匀化。为了得到较好的校正效果、较快的计算速度, 增加实时在线处理的能力, 并使不同视点的线阵相机采集的图像都具有统一的光照均衡效果, 本文提出了一种基于伽马函数的多视点相机自适应非均匀光照校正方法, 该方法通过构造参数可根据某像素位置的光照分量值自适应调整的伽马函数, 对该点像素灰度值进行伽马变换得到校正后的灰度值, 其表达式为

$$O_s(j) = C_s \times 255 \times \left[ \frac{I_s(j)}{255} \right]^\gamma \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

$$\gamma = \alpha \left[ \frac{\bar{L}_s - L_s(j)}{\bar{L}_s} \right] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

其中,  $I_s(j)$  为第  $s$  个线阵相机输入像素灰度值;  $O_s(j)$

为第  $s$  个线阵相机输出像素灰度值, 且满足若  $O_s(j) \geq 255, O_s(j) = 255$ ;  $\gamma$  为非均匀光照校正参数, 其值影响校正效果, 其中的参数  $\alpha$  取值范围为  $0 \sim 1$ , 若  $\alpha$  的值越趋近于 0, 校正程度越大, 当  $\alpha$  的值趋近于 1 时, 则不做校正处理, 一般可设定  $\alpha = 0.5$ ;  $L_s(j)$  为第  $s$  个线阵相机帧(行)光照分量;  $\bar{L}_s$  为第  $s$  个线阵相机帧(行)光照分量均值;  $C_s$  为多视点光照均衡系数, 用于均衡各线阵相机间的光照不平衡性, 其计算表达式为

$$C_s = \frac{D}{\bar{L}_s} \quad (14)$$

式中,  $D$  为设定的多视点光照均衡目标值;  $\bar{L}_s$  为第  $s$  个线阵相机帧(行)光照分量均值。

设  $D=128, \bar{L}_s=128$  和  $D=128, \bar{L}_s=80$  时, 得到图像某像素处提取到的光照分量值  $L(j)$  分别为 0, 64, 128, 192, 255 时的不同光照情况下校正前后图像灰度值变化情况对比曲线, 如图 5 所示, 其中输入图像灰度值表示校正前的原值, 输出图像灰度值表示经过本文方法校正后的值。由图 5 可知, 本文方法可以根据多视点光照均衡目标值、光照分量的均值和像素处提取到的光照分量值进行自适应调节, 选取不同的像素灰度值变化曲线, 如果某像素处提取到的光照分量值小于光照分量的均值, 可以有效提高该像素点的亮度, 反之则降低该像素点的亮度, 实现光照均衡化。

设  $D=128, \alpha=0.5$ , 对图 6(a) 采用改进自适应伽马函数进行非均匀光照校正, 校正后如图 6(b) 所示, 对应灰度直方图如图 6(d) 和 (e) 所示, 通过对比, 本文方法处理后一方面均衡了由于不均匀光照导致的图像明暗不均的情况, 另一方面压缩了图像的动态范围, 使图像的质量显著提高。

### 3 多视点图像自适应细节对比度增强

输送带故障检测是通过输送带表面纹理情况进行, 在非均匀光照校正之后要对输送带图像上的纹理等细节进行对比度增强, 以突出输送带表面纹理特征, 便于故障的识别和定损, 由于图像边缘和纹理细节的灰度值相对于该位置的光照值将有较大的差别, 根据差别的程度进行增强, 使输送带图像中的边缘和纹理细节更加突出。构造参数可根据图像细节情况自适应调整的伽马函数, 进行图像细节对比度增强, 其计算公式为

$$E_s(j) = 255 \times \left[ \frac{O_s(j)}{255} \right]^\varepsilon \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

$$\varepsilon = \beta \left[ \frac{I_s(j) - \bar{L}_s(j)}{\bar{L}_s(j)} \right] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

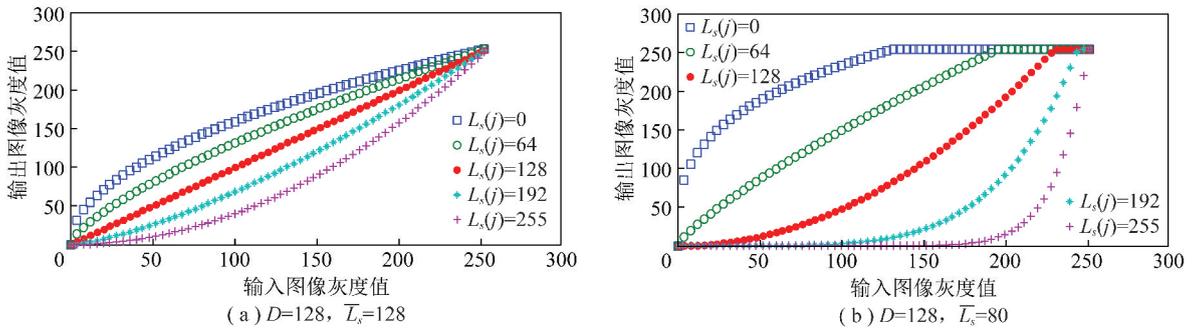


图5 不同光照条件下图像灰度变化对比曲线

Fig. 5 Contrast curve of image gray-change in varying illumination conditions

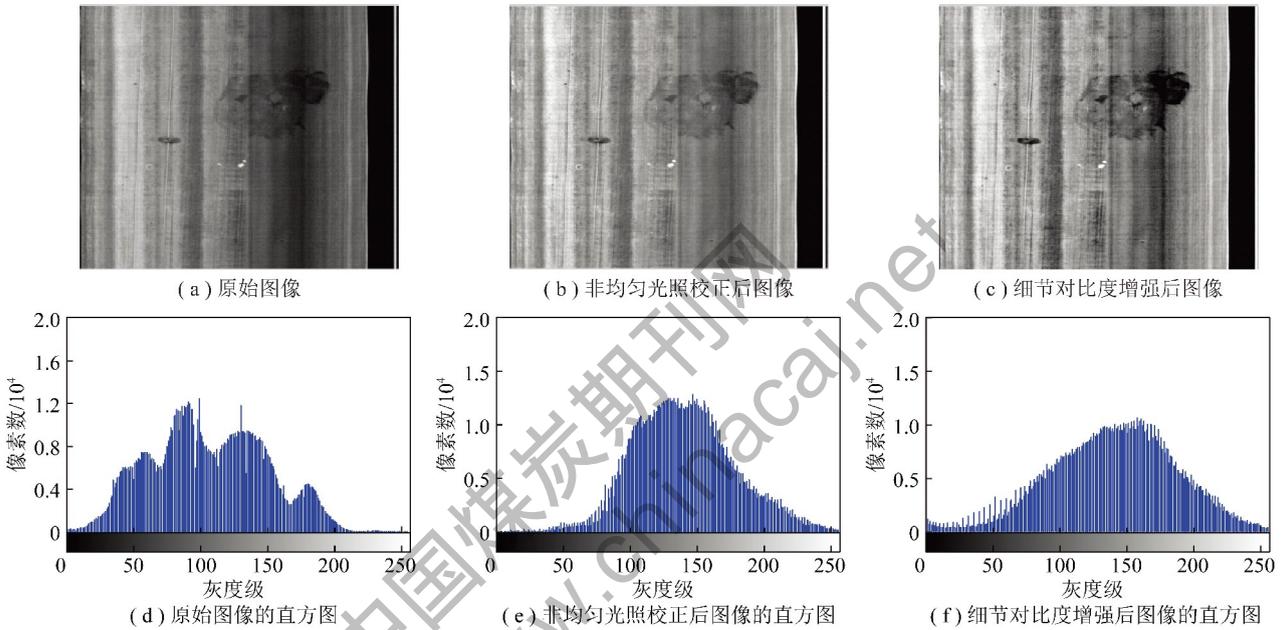


图6 图像自适应增强结果( $D=128, \alpha=0.5, \beta=0.5$ )

Fig. 6 Results of the image using adaptive enhancement processing( $D=128, \alpha=0.5, \beta=0.5$ )

式中,  $E_s(j)$  为第  $s$  个线阵相机图像细节对比度增强后的输出像素灰度;  $\varepsilon$  为细节对比度增强参数, 其值影响校正效果, 其计算公式中的参数  $\beta$  取值范围为  $0 \sim 1$ , 若  $\beta$  的值越趋近于  $0$ , 细节对比度增强程度越大, 当  $\beta$  的值趋近于  $1$  时, 则不做增强处理, 一般可设定  $\beta=0.5$ 。

设  $\beta=0.5$ , 对图 6(b) 进行图像细节对比度增强后如图 6(c) 所示, 对应直方图如图 6(e) 和 (f) 所示, 通过对比, 本文方法可以突出图像的细节信息, 增强对比度。

#### 4 实验分析验证

为了验证本文方法的有效性, 选取两个不同视点的线阵相机采集的同一输送带表面的图像, 如图 7 所示, 由图 7 可知, 两相机光照情况不同, 左侧相机图片整体较暗, 图像灰度均值为  $41.2112$ , 右侧相机图片有亮度过亮突出情况, 图像灰度均值为  $77.1532$ , 两

幅图光照环境不同, 光照严重不均。



(a) 左侧相机 (b) 右侧相机

图7 输送带两不同视点相机原始图像

Fig. 7 Original image of two view camera in conveyor belt

分别采用直方图均衡法、灰度变换法、文献 [4] 提出的 Retinex 法、文献 [8] 提出的 Retinex 法、文献 [11] 提出的 Retinex 法和本文方法 ( $D=128, \alpha=0.5, \beta=0.5$ ) 等校正方法进行图像增强处理, 处理后的图像如图 8 所示。通过效果图对比可知, 本文方法处理后的图像亮度适宜、图像灰度分布均匀、

输送带表面条纹细节和缺陷清晰,具有更好的图像增强效果。

为了更客观的验证本文方法的有效性,表1从均值、标准差、信息熵、清晰度和对比度等方面对各种图像增强方法进行了客观定量的比较。清晰度采用的

计算公式为

$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\nabla_x f(i,j)^2 + \nabla_y f(i,j)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中, $\nabla_x f(i,j)$ , $\nabla_y f(i,j)$ 分别为像素 $f(i,j)$ 在 $x,y$ 方向上的一阶差分。

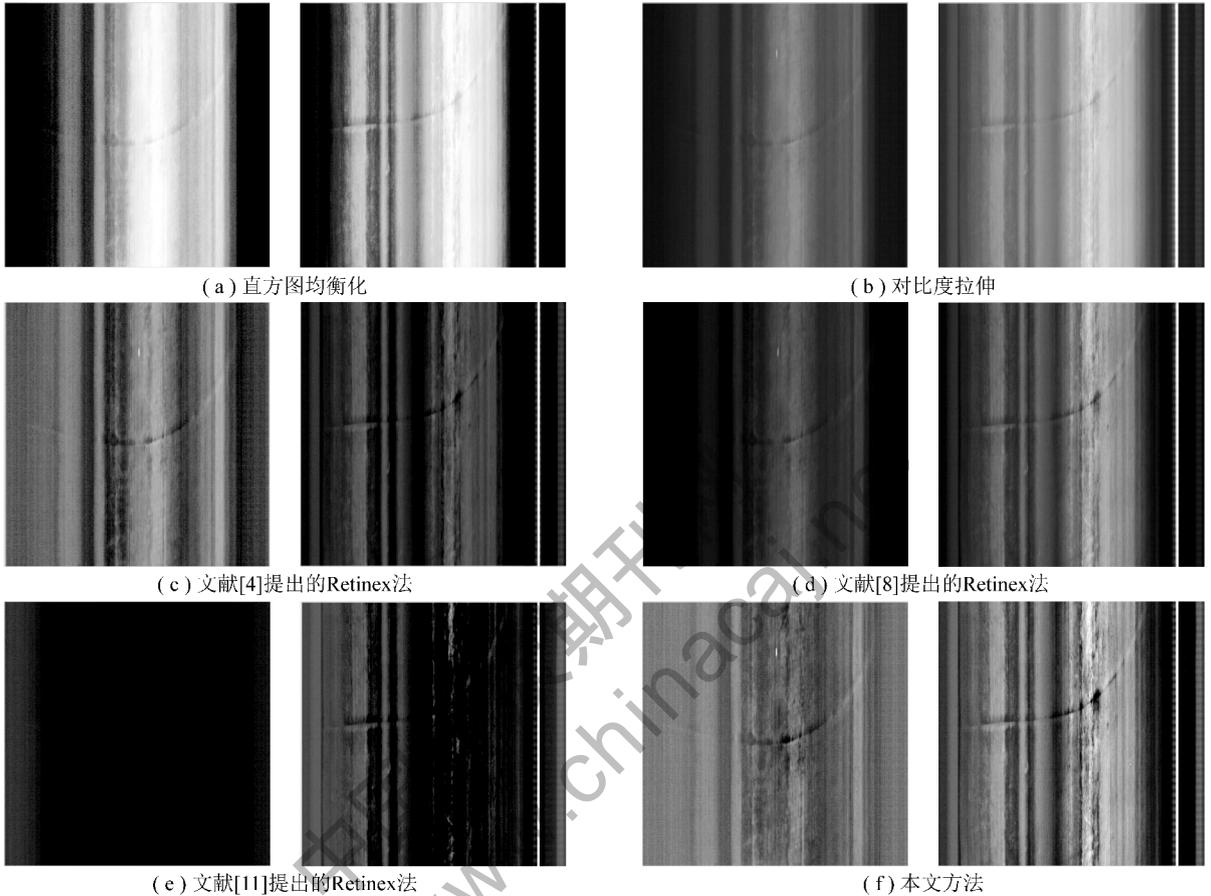


图8 不同方法图像增强处理后的结果比较

Fig. 8 Results of the image in different image enhancement processing methods

表1 不同方法增强处理后图像评价指标比较

Table 1 Comparison of image evaluation indices in different methods of enhanced processing

图像	视点	均值	标准差	信息熵	清晰度	对比度
原始图像	相机(左)	41.211 2	14.920 6	5.480 6	1.331 4	2.700 2
	相机(右)	77.153 2	41.909 1	6.897 0	6.200 7	59.288 0
直方图均衡化	相机(左)	127.526 1	73.939 2	5.451 8	8.542 2	138.051 4
	相机(右)	127.517 2	73.933 1	6.747 0	4.068 9	32.810 8
伽马对比度增强 $\gamma=0.5$	相机(左)	100.875 9	17.988 9	5.469 3	1.695 6	4.363 9
	相机(右)	135.460 3	36.319 7	6.703 1	1.823 9	7.165 6
文献[4]方法	相机(左)	110.863 0	19.809 2	6.030 4	6.308 3	62.920 5
	相机(右)	82.077 4	23.023 2	5.491 2	2.486 1	12.960 6
文献[8]方法	相机(左)	80.140 3	11.704 1	5.310 3	1.686 9	4.337 2
	相机(右)	100.814 7	28.229 4	6.529 3	2.110 7	10.397 1
文献[11]方法	相机(左)	44.977 8	25.684 5	6.110 6	1.288 8	2.857 1
	相机(右)	76.145 4	19.711 9	5.670 6	2.145 0	11.311 7
本文方法	相机(左)	124.278 8	13.420 2	5.752 9	6.395 6	61.567 6
	相机(右)	119.754 6	37.316 9	7.118 5	5.162 4	48.378 2

对比度定义为每一点像素灰度值向周围 8 近邻域方向的扩散程度的平均值,其计算公式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_{\delta}(i,j)$$

其中,  $\delta(i,j) = |i-j|$ , 即相邻像素间灰度差;  $P_{\delta}(i,j)$  为相邻像素间的灰度差为  $\delta$  的像素分布概率。

比较结果表明,直方图均衡化法处理后两视点图像虽然均值、标准差一致性好,但标准差增大,图像明暗不均严重,图像质量较差;伽马对比度增强法、文献[4]方法、文献[8]方法、文献[11]方法虽能够对非均匀光照起到一定的校正作用,校正后图像标准差比原始图像有所减小,但两视点图像平均亮度差别大,并且图像清晰度、对比度差,不利于输送带故障的识别检测。相比于其他方法,本文方法有效实现了图像的增强处理,处理后的两幅不同视点图像的均值接近,实现了不同视点不同光照环境条件下线阵相机采集图像平均亮度的一致性,便于后续进行缺陷检测。本文方法在保持信息量的基础上改善了原始图像光照的均匀性,消除不均匀光照影响,提高了图像清晰度和对比度,突出了图像中细节反差和纹理变换特征。通过对现有几种处理方法的指标综合比较下,本文方法的处理效果具有显著的优势。通过在英特尔 i7 CPU 的电脑使用 C#语言采用多线程编程实现本文方法,对于 2 048×2 048 图像,处理时间小于 300 ms,给后续故障检测识别留出足够时间,适合于多视点矿用输送带故障在线检测。

## 5 结 语

提出的矿用输送带多视点图像自适应增强方法,可去除不均匀照度、井下恶劣环境对图像质量的影响,使不同视点不同光照环境条件下线阵相机采集图像的平均亮度具有一致性,压缩图像动态范围,提高对比度,使得图像中阴暗区域的细节更加明显,解决了输送带故障检测采集的图像存在光照不均、图像质量差、影响故障检测与识别的问题,通过对现有几种图像增强方法校正处理后图像的主观评价和客观定量的比较,本文方法处理效果具有显著的优势,适合于多视点矿用输送带故障在线检测。

## 参考文献 (References):

- [1] YANG Yanli, MIAO Changyun, LI Xianguo, et al. On-line conveyor belts inspection based on machine vision [J]. *Optik*, 2014, 125: 5803-5807.
- [2] LI Jie, MIAO Changyun. The conveyor belt longitudinal tear on-line detection based on improved SSR algorithm [J]. *Optik*, 2016, 127: 8002-8010.
- [3] 梅秀庄, 苗长云, 杨彦利, 等. 矿用输送带表面破损的自动检测方法 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41 (S1): 259-265.  
MEI Xiuzhuang, MIAO Changyun, YANG Yanli, et al. Automatic detection method for mine conveyor belt surface damage [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41 (S1): 259-265.
- [4] 张凌云, 苗长云, 李现国. 基于 Retinex 的 X 光钢丝绳芯输送带图像校正和增强方法研究 [J]. *矿山机械*, 2015, 43 (12): 68-72.  
ZHANG Lingning, MIAO Changyun, LI Xianguo. Study on correction and enhancement of X-ray image of steel cord conveyance belt based on Retinex [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2015, 43 (12): 68-72.
- [5] 赵晓霞, 王汝琳. 改进的多尺度 Retinex 算法及其应用 [J]. *计算机工程*, 2011, 37 (6): 209-211.  
ZHAO Xiaoxia, WANG Rulin. Improved multi-scale Retinex Algorithm and its application [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37 (6): 209-211.
- [6] 方帅, 杨静蓉, 曹洋, 等. 图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17 (7): 748-755.  
FANG Shuai, YANG Jingrong, CAO Yang, et al. Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17 (7): 748-755.
- [7] 王林志, 姚晓天, 孟卓, 等. 基于自适应多尺度 Retinex 的光学相干层析图像衰减补偿算法 [J]. *中国激光*, 2013, 40 (12): 1204001.  
WANG Longzhi, YAO Xiaotian, MENG Zhuo, et al. An optical coherence tomography attenuation compensation algorithm based on adaptive multi-scale retinex [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (12): 1204001.
- [8] LEE S, KWON H, HAN H, et al. A space-variant luminance map based color image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56 (4): 2636-2643.
- [9] LEE S, HAN H, KWAK B, et al. Color image enhancement method using a space-variant luminance map [A]. *Proceedings of the, 2010 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics [C]*. IEEE, 2010: 413-414.
- [10] 刘志成, 王殿伟, 刘颖, 等. 基于二维伽马函数的光照不均匀图像自适应校正算法 [J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36 (2): 191-196.  
LIU Zhicheng, WANG Dianwei, LIU Ying, et al. Adaptive adjustment algorithm for non-uniform illumination images based on 2D gamma function [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36 (2): 191-196.
- [11] 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.
- [12] SHIN Y, JEONG S, LEE S. Efficient naturalness restoration for non-uniform illumination images [J]. *IET Image Processing*, 2015, 8 (9): 662-671.
- [13] LIU M F, LIU Y, HU H J, et al. Genetic algorithm and mathematical morphology based binarization method for strip steel defect image with non-uniform illumination [J]. *Journal of Visual Communi-*

- cation and Image Representation, 2016, 37: 70-77.
- [14] KONG T L, ISA N A M. Enhancer-based contrast enhancement technique for non-uniform illumination and low-contrast images [J]. *Multimed Tools Appl*, 2017, 76: 14305-14326.
- [15] 林天圆, 王杰, 李金屏. 一种光照不均匀图像的灰度校正方法 [J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2015, 29(6): 401-405.  
LIN Tianyuan, WANG Jie, LI Jinping. An effective correction method for uneven illumination images [J]. *Journal of University of Jinan(Sci. & Tech.)*, 2015, 29(6): 401-405.
- [16] 李国辉, 张龙龙, 吴成茂, 等. 基于光照和对比度均衡的遥感图像增强 [J]. *西安邮电大学学报*, 2015, 20(6): 86-92.  
LI Guohui, ZHANG Longlong, WU Chengmao, et al. Remote sensing image enhancement based on illumination and contrast balancing [J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2015, 20(6): 86-92.
- [17] 余顺园, 朱虹. 夜间有雾图像的光照模型构建及去雾 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 730-734.  
YU Shunyuanyuan, ZHU Hong. Lighting model construction and haze removal for nighttime image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 730-734.