

基于改进同态滤波的带钢缺陷亮度不均匀校正算法

刘源 夏春蕾

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 在带钢表面缺陷自动化检测过程中,由于摄像机本身以及摄像环境的影响,会导致获取的图像出现不均匀的亮度,这对后续的缺陷图像分割和识别有较大的影响。基于此,提出了一种基于改进同态滤波的亮度不均匀校正方法,结合带钢表面缺陷特点对滤波器的截止频率进行重新选择,针对带钢图像的高低频分量采用不同的滤波函数分别进行处理,再用处理后的高低频分量重构得到亮度校正后的图像。实验结果表明,本文改进同态滤波亮度校正后的图像质量更高,用亮度校正后的图像质量参数 Q 值对其进行评价,该方法的平均 Q 值达到 0.901 4,相比其他方法的参数值更高。

关键词: 同态滤波;截止频率;亮度不均匀校正;带钢表面缺陷

中图分类号: TN37 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

A correction algorithm for uneven brightness of strip steel defects based on improved homomorphic filtering

Liu Yuan Xia Chunlei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the process of automatic strip steel surface defect detection, due to the influence of the camera itself and the camera environment, the acquired images will have uneven brightness, which has a greater impact on the subsequent defect image segmentation and recognition. Based on this, this paper proposes a brightness unevenness correction method based on improved homomorphic filtering, which combines the characteristics of strip surface defects to reselect the cutoff frequency of the filter, and uses different filter functions for the high and low frequency components of the strip image. After processing, the processed high and low frequency components are used to reconstruct the brightness-corrected image. The experimental results show that the improved homomorphic filtering in this paper has higher image quality after brightness correction. The image quality parameter Q value after brightness correction is used to evaluate it. The average Q value of the method reaches 0.901 4, which is higher than the parameter values of other methods.

Keywords: homomorphic filtering; cutoff frequency; uneven brightness correction; strip surface defects

0 引言

基于机器视觉的带钢表面缺陷检测是带钢表面质量检测常用的方法之一,其图像质量采集的好坏对最终缺陷的识别与分类有较大的影响。而带钢表面缺陷图像在采集过程中不可避免会受到采集设备和各种环境的影响,这些影响都会降低图像采集的质量。图像质量下降最明显的表现就是缺陷图像整体亮度不均匀、对比度低、缺陷区域和背景区域差别小,从而导致缺陷区域难以区分出来。基于此,常采用图像增强的方法对亮度不均匀图像进行校正^[1]。

研究人员针对亮度不均匀图像提出了许多解决方法,

常见的方法有^[2]:直方图均衡化法、基于梯度域的方法、基于 Retinex 理论的方法、伽马校正方法、非锐化掩膜方法、模糊的方法、基于空间变化照度图的校正方法等。其中,直方图均衡化法是灰度变换法中最具代表性的方法,将图像灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内均匀分布,该算法简单高效,但容易造成过增强问题,导致图像中大量有用信息的丢失。基于梯度域的增强方法能够很好地保持图像的细节和层次感,但容易造成图像的锐化,且重建图像所需要的算法复杂^[3]。基于 Retinex 理论的方法是通过模拟人类大脑皮层的成像原理,计算照射分量和反射分量以消除光照的影响,但该方法假设图像中

空间照度是缓慢变化的,这与带钢表面图像特征不相符^[4]。伽马校正方法虽然增强了图像的对比度,但其容易造成光照不均匀图像的过度饱和或者欠饱和^[6]。非锐化掩膜的方法可以增强图像的细节和边缘,但存在噪声放大的问题^[6-7]。基于模糊的方法利用模糊理论判断图像的亮度并区分出低亮度和高亮度并分别进行处理,但该算法运算复杂,且影响算法关键性能的参数难以选择^[8-9]。基于空间照度图的方法对不均匀图像进行校正利用图像中的光照分布特征,由于所用的高斯滤波函数边缘保持能力差导致提取图像边缘模糊,照度细节丢失^[10]。综上所述,这些亮度不均匀校正方法或多或少都有其不足之处,而同态滤波是一种基于亮度成型模型的滤波方法^[11-13],结合了图像空域特征和频域特征,常常被应用于图像的亮度不均匀校正,其原理简单,计算量小^[14]且效果往往比其他方法好。

本文针对带钢缺陷图像采集过程中出现亮度不均匀的情况,提出了一种基于改进同态滤波的亮度不均匀校正方法。该方法结合带钢表面缺陷特点对滤波器截止频率进行重新选择,在传统指数型同态滤波器的基础上对其进行改进,针对带钢图像的高低频分量采用不同的滤波函数分别进行处理,再用处理后的高低频分量重构得到亮度校正后的图像。最后在 MATLAB 平台上与直方图均衡化、传统同态滤波进行实验对比分析,以验证本文方法的实用性,这对提高带钢表面缺陷的自动监测技术有较高的应用价值。

1 传统同态滤波亮度不均匀校正算法

同态滤波常常将一幅图像用照射分量和反射分量的乘积表示^[13],如式(1)所示。

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

其中, $f(x,y)$ 表示生成的图像, $i(x,y)$ 为照射分量, $r(x,y)$ 表示反射分量。同态滤波的整体流程如图 1 所示。

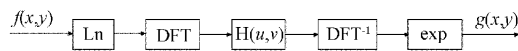


图 1 同态滤波流程

图 1 中, Ln 为对数变换, DFT 为傅里叶变换, $H(u,v)$ 为同态滤波器, DFT^{-1} 为傅里叶逆变换。算法具体计算步骤如下:

1)对式(1)两边取对数,如下式:

$$\ln f(x,y) = \ln i(x,y) \cdot \ln r(x,y) \quad (2)$$

2)对式(2)两边进行傅里叶变换,将函数转换到频域,如下式:

$$F[\ln f(x,y)] = F[\ln i(x,y) + \ln r(x,y)] \quad (3)$$

$$F(u,v) = I(x,y) + R(x,y) \quad (4)$$

3)用频域增强函数 $H(u,v)$ 处理 $F(u,v)$,如下式:

$$H(u,v)F(u,v) = H(u,v)I(x,y) + H(u,v)R(x,y) \quad (5)$$

4)对式(5)进行傅里叶逆变换,如下式:

$$h_j(u,v) = h_i(x,y) + h_r(x,y) \quad (6)$$

5)对式(6)两边取指数,如下式:

$$g(x,y) = \exp |h_j(u,v)| = \exp |h_i(x,y)| \cdot \exp |h_r(x,y)| \quad (7)$$

图像的低频表示图像强度变化平缓的地方,对应于带钢图像中亮度均匀分布的区域,高频表示图像强度变化剧烈的地方,对应于带钢图像中亮度显著变化的区域。通常一幅图像的低频部分对应于照射分量,高频部分对应于反射分量。对傅里叶变换后的图像设计相应的频域滤波器,实现对低频的抑制和对高频的增强,以提升图像整体对比度从而实现图像亮度不均匀情况的校正。常用的同态滤波器有高斯型同态滤波器、巴特沃斯型同态滤波器、指数型同态滤波器等^[16]。

传统的高斯型同态滤波器滤波函数^[17]为:

$$H(u,v) = 1 - e^{-\frac{D(u,v)}{2D_0^{2n}}} \quad (8)$$

传统的 N 阶巴特沃斯型同态滤波器滤波函数^[18]为:

$$H(u,v) = \frac{1}{\left(1 + \frac{cD_0}{D(u,v)}\right)^{2n}} \quad (9)$$

传统的指数型同态滤波器滤波函数为:

$$H(u,v) = e^{-\frac{D_0}{D(u,v)}} \quad (10)$$

式中: $D(u,v)$ 表示频率 (u,v) 到中心频率 (u_0,v_0) 的距离为 $D(u,v) = \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}$, D_0 为截止频率。

2 改进同态滤波亮度不均匀校正算法

以指数型同态滤波器为基础,对截止频率进行重新选择,对滤波函数进行改进,分别针对式(4)中的 $I(x,y)$ 和 $R(x,y)$ 建立高频和低频滤波函数,对高频分量和低频分量分别进行处理,最后经过傅里叶逆变换和取指数(即取对数逆运算)后得到亮度校正后的图像。其整体流程如图 2 所示。

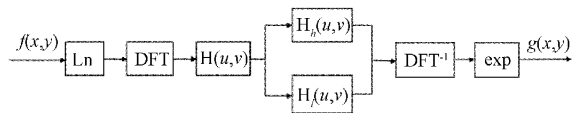


图 2 改进同态滤波整体流程

2.1 截止频率 D_0 的选择

传统同态滤波器的截止频率通常以经验值作为标准,而这往往不符合实际要求。若截止频率过高,则低频分量将被过度抑制,从而导致校正后的图像整体偏暗;若截止频率过低,则低频分量无法被完全抑制,从而不能有效校正亮度不均匀的现象。对于亮度不均匀的不同类型的缺陷图像,必须分析特定条件并选择适当的截止频率,以达到最佳校正效果。基于此,通过频谱分析来给出截止频率的选择,如图 3 所示,上图依次为辊印、划痕、刮伤、轧坏缺陷原图,下图为对应的频谱图。

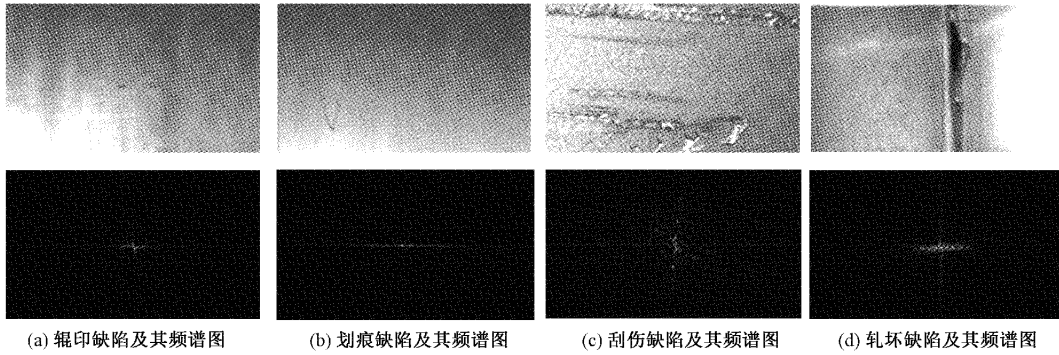


图 3 带钢常见缺陷及其频谱图

通过分析带钢缺陷图像的频谱图,可以看出缺陷图像的低频部分包含了图像的大部分能量,高频部分只包含了少部分能量,这是因为带钢表面缺陷要么较小,以无缺陷的背景为主,要么缺陷很大,但缺陷边缘模糊,对高频贡献不强烈。因此可以得知,要想得到好的校正效果,选择的截止频率要使频谱图有足够大的能量。本文通过多次选用不同的截止频率进行实验,并计算各自的能量百分比,结果如表 1 所示。

表 1 缺陷频谱图不同截止频率的能量百分比 %

截止频率	缺陷类型			
	辊印	划痕	刮伤	轧坏
$D_0 = 4$	88.62	83.73	85.69	86.92
$D_0 = 8$	98.96	99.12	99.52	98.38
$D_0 = 16$	99.01	99.36	99.69	99.27
$D_0 = 32$	99.25	99.71	99.83	99.55

由表 1 可以看出, $D_0 = 4$ 时能量所占百分比均低于 90%, 而 $D_0 = 8$ 时能量所占百分比均达到了 98% 以上, 已经使频谱图有足够大的能量, 虽然 $D_0 = 16$ 和 $D_0 = 32$ 有更高的能量百分比, 但过高的截止频率会过度抑制低频分量, 往往得不到好的亮度校正效果, 而 $D_0 = 8$ 已能满足本文需求, 故本文选择 $D_0 = 8$ 来进行带钢缺陷图像的亮度不均匀校正。

2.2 滤波函数的改进

本文提出的改进同态滤波器是在传统的指数型同态滤波器的基础上, 分别建立了高频分量和低频分量的滤波函数, 以对高频分量和低频分量分别进行处理, 最后经过傅里叶逆变换和取指数(即取对数逆运算)后得到亮度校正后的图像。改进的指数型同态滤波函数如下:

$$H_h = (r_h - r_l) \cdot e^{\left(-\frac{cD_0}{D(u,v)}\right)^n} + r_l \quad (11)$$

$$H_l = 1 - [(r_h - r_l) \cdot e^{\left(-\frac{cD_0}{D(u,v)}\right)^n} + r_l] \quad (12)$$

其中, H_h 为高频滤波函数; H_l 为低频滤波函数; r_h 为高频增益, 当 $r_h > 1$ 时, 表示对频域高频部分增强; r_l 为

低频增益, 当 $r_l < 1$ 时, 表示对频域低频部分削弱。

假设原图像为 $f(x, y)$, 对滤波后的两幅图像进行傅里叶逆变换和取指数运算, 经过高通滤波器得到的图像为 $f_1(x, y)$, 经过低通滤波器得到的图像为 $f_2(x, y)$, 最后将 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 线性相加, 就得到最终的亮度校正图像 $g(x, y)$, 如式(13)所示。

$$g(x, y) = f_1(x, y) + f_2(x, y) \quad (13)$$

3 实验过程及结果分析

本文旨在通过实验验证改进同态滤波的亮度不均匀校正效果, 在 MATLAB 平台上分别用直方图均衡化、传统同态滤波、改进同态滤波对其进行亮度不均匀校正, 其中改进同态滤波的主要参数如下 $D_0 = 8, r_h = 1.13, r_l = 0.04$ 。如图 4(a) 所示, 从上往下依次为辊印、划痕、刮伤、轧坏 4 种亮度不均匀的带钢表面典型缺陷, 实验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 尽管直方图均衡化能提高图像的整体对比度, 但不能有效地校正不均匀的亮度背景, 传统同态滤波器的亮度校正效果也很差, 而改进同态滤波亮度校正后的图像亮度明显更加均匀, 并且缺陷边缘的对比度明显增强。因此可以看出, 改进同态滤波可以有效的校正带钢缺陷的不均匀亮度。为了进一步验证改进算法的校正效果, 采用文献[19]中的评价方法来对亮度校正后的图像进行评价, 评价结果如表 2 所示。

其中, Q 值表示处理后图像相对原图像的失真程度, Q 值为 1 时, 图像质量最好, Q 值为 -1 时, 图像质量最差。从表 2 可以得到, 直方图均衡化平均 Q 值为 0.702 0, 传统同态滤波平均 Q 值为 0.781 8, 改进同态滤波平均 Q 值为 0.901 4, 改进同态滤波的 Q 值相比直方图均衡化、传统同态滤波更接近于 1, 这表明改进同态滤波的亮度校正效果更好, 与视觉上的效果是一致的。

本文对缺陷图像进行亮度校正的目的是提高后续图像处理的效果, 其校正后的图像对后续图像处理有何影响, 还要进一步研究。为了进一步验证本文改进亮度不均匀校正算法对后续图像处理的影响, 结合带钢表面缺陷类

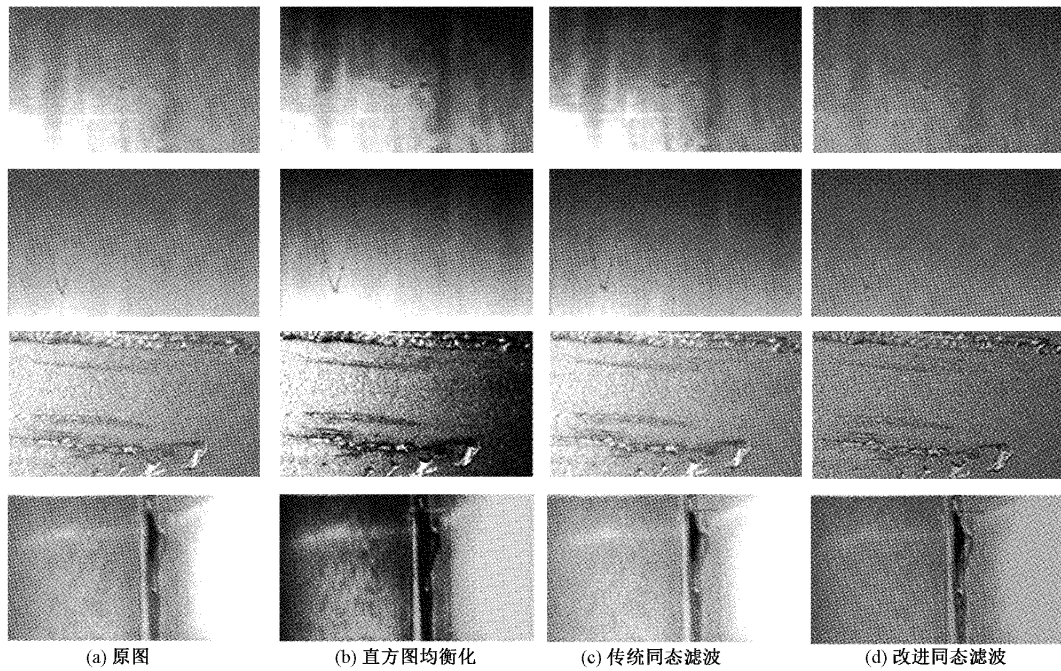


图4 改进同态滤波与传统方法亮度不均匀校正对比图

表2 校正后图像各质量参数值(Q值)

缺陷类型	亮度不均匀校正方法		
	直方图均衡化	传统同态滤波	改进同态滤波
辊印	0.712 5	0.752 6	0.864 2
划痕	0.643 8	0.783 4	0.945 6
刮伤	0.696 2	0.816 1	0.931 2
轧坏	0.755 3	0.774 9	0.864 5

型和特点,先对缺陷图像进行中值滤波去噪,再采用Prewitt边缘检测算法对直方图均衡化、传统同态滤波、改进同态滤波亮度校正后的图像进行边缘检测,检测结果如图5所示。其中图5(a)为缺陷原图,从上往下依次为辊印、划痕、刮伤、轧坏缺陷,图5(b)为直方图均衡化后Prewitt边缘检测结果,图5(c)为传统同态滤波亮度校正后Prewitt边缘检测结果,图5(d)为改进同态滤波亮度校正后Prewitt边缘检测结果。

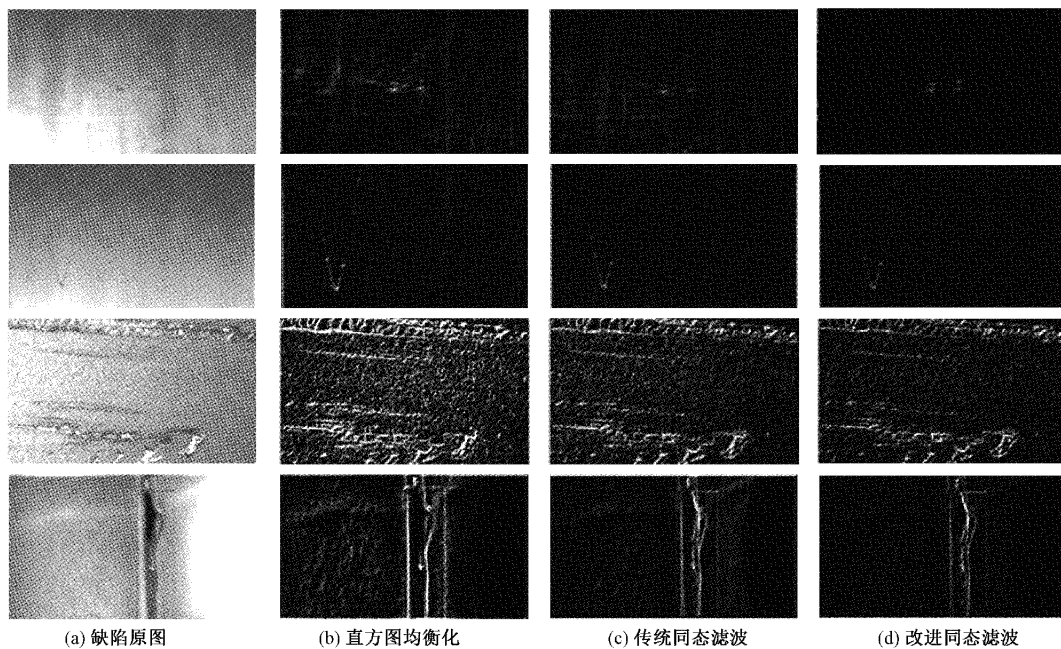


图5 Prewitt边缘检测对比图

从实验结果可以看出,直方图均衡化、传统同态滤波亮度校正后边缘检测的边缘边界虽然很清晰,但是会检测到较多伪边缘,这非常不利于后续缺陷的识别与分类。而在本文改进同态滤波亮度校正后的边缘检测中,其缺陷定位准确,边界检测清晰,不容易受到噪声的影响,也不会检测到伪边缘。综上所述,本文改进同态滤波亮度不均匀校正算法能够较好地改善亮度不均匀缺陷图像的质量,对提高后续缺陷图像分割和缺陷识别分类有较好的效果。

4 结 论

本文以传统同态滤波算法为基础,提出了一种基于改进同态滤波的图像增强方法用于带钢表面缺陷图像的亮度不均匀校正,结合带钢表面缺陷特点对滤波器的截止频率进行重新选择,针对带钢图像的高低频分量采用不同的滤波函数分别进行处理,再用处理后的高低频分量重构得到亮度校正后的图像。实验结果表明,改进同态滤波亮度不均匀校正算法能够较好地改善亮度不均匀缺陷图像的质量,对提高后续缺陷图像分割和缺陷识别分类有较高的应用价值。后续研究将针对一些微型缺陷在亮度校正后边缘模糊的问题进行下一步的研究,以进一步提高带钢缺陷自动化检测的准确性。

参考文献

- [1] 郑娜,穆平安.基于改进双边滤波的非均匀光照图像校正算法[J].电子测量技术,2019,42(17):157-161.
- [2] 王智奇,李荣冰,刘建业,等.基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J].电子测量技术,2020,43(24):75-80.
- [3] 梁琳,何卫平,雷蕾,等.光照不均图像增强方法综述[J].计算机应用研究,2010,27(5):1625-1628.
- [4] 江小威.基于Retinex亮度校正与感知对比度的图像增强算法[J].电子测量与仪器学报,2018,32(6):115-123.
- [5] 陆涛.基于统计特征分类耦合自适应Gamma校正的图像增强算法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):154-162.
- [6] DENG G. A generalized unsharp masking algorithm[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2011,20(5):1249-1260.
- [7] 陈春谋.基于机器视觉与图像分割的工件表面残胶识别算法[J].电子测量技术,2019,42(15):74-78.
- [8] HASIKIN K, MAT ISA N A. Adaptive fuzzy intensity measure enhancement technique for non-uniform illumination and low-contrast images[J]. Signal, Image and Video Processing,2015,9(6):1419-1442.
- [9] 王瑞,姚爱琴,杨瑞,等.基于小波变换模极大的多尺度图像边缘检测在烟雾图像中的应用[J].国外电子测量技术,2020,39(9):63-67.
- [10] 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.
- [11] DASH S, SENAPATI M R, SAHU P K, et al. Illumination normalized based technique for retinal blood vessel segmentation[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2020, 31(1):351-363.
- [12] 王伟江,彭业萍,曹广忠,等.面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J].仪器仪表学报,2019,40(8):131-139.
- [13] 蔡秀梅,马今璐,吴成茂,等.基于模糊同态滤波的彩色图像增强算法[J].计算机仿真,2020,37(6):342-346.
- [14] 程新.基于同态滤波的图像增强算法研究[D].西安:西安邮电大学,2016.
- [15] 马龙天,张成义.基于Matlab的同态滤波器的优化设计[J].应用光学,2010,31(4):584-588.
- [16] 冯相辉.一种改进的同态滤波图像增强算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(1):138-145.
- [17] 王秋云.一种改进的照度不均图像增强方法[J].自动化与仪器仪表,2017(2):33-35.
- [18] 崔帅,刘波,丁德红.基于傅里叶变换的森林红外图像增强算法研究[J].红外技术,2015,37(1):29-33.
- [19] 丁绪星,朱日红,李建欣.一种静止图像质量评价指标[J].南京理工大学学报,2004,28(5):507-509.

作者简介

刘源,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:liuyuan9624@163.com