

文章编号:1007-2780(2019)09-0888-09

像素级自适应融合的夜间图像增强

王 成^{1*} 张艳超²

(1. 中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125001;

2. 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: 针对夜间图像整体亮度低、图像细节多集中在较低灰度级范围内的特点, 本文提出了一种像素级自适应融合的夜间图像增强方法。首先, 通过高通滤波的方式滤除图像的大部分暗背景信息, 以整体增强图像各区域灰度细节; 然后, 将滤波后的图像与原始图像进行像素级自适应加权融合, 其中每个像素点对应的两个权值取决于滤波图像内对应像素值与目标模糊集、背景模糊集的接近情况: 越接近目标模糊集, 滤波图像对应像素权值增大, 同时原始图像对应像素权值减小; 越接近背景模糊集, 则相反, 以此来进一步增强图像的全局对比度, 增强视觉效果。实验结果表明: 增强后的夜间图像在灰度细节和全局对比度方面都得到了显著提高。对于 320×256 分辨率的灰度图像, 在 CPU 主频为 3.0 GHz 的硬件环境下, 处理时间小于 10 ms。采用本文方法处理的夜间退化图像的成像质量得到了明显改善, 且其良好的实时性能能够更好地满足工程应用需求。

关键词: 夜间图像增强; 高通滤波; 图像融合; 权值自适应

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193409.0888

Night image enhancement based on pixel level adaptive image fusion

WANG Cheng^{1*}, ZHANG Yan-chao²

(1. Chinese People's Liberation Army 91245 Troops, Huludao 125001, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of night images, such as low brightness and most of the image details concentrating in the low gray range, a night image enhancement method based on pixel level adaptive fusion is proposed. Firstly, a high pass filter is used to filter most of the dark background information of the image, so as to enhance the gray details of each region of the image. Then, the filtered image is fused with the original image in the way of pixel level weighting adaptively. The two weights of each pixel, in filtered image and original image respectively, depend on two distances: one is the distance between the pixel value and the target fuzzy set, and the other is the distance between the pixel value and the background fuzzy set. If the pixel value is closer to the target fuzzy set, the weight of the filter image is increased and the weight of the original image is reduced, correspondingly. If the pixel value is closer to the background fuzzy set, the case is the opposite. In

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-05-18.

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(No.20180201057SF)

Supported by Jilin Provincial Key R&D Program(No. 20180201057SF)

* 通信联系人, E-mail: iailly@163.com

this way, the global contrast of the image is further enhanced and the visual effect is improved. Experimental results indicate that the night image enhanced has been improved significantly in both gray detail and global contrast. The processing time is less than 10 ms in the hardware environment of CPU with the main frequency of 3.0 GHz for 320×256 resolution gray scale images. The quality of the degraded night image has been improved greatly, and its good real-time performance can meet the needs of the engineering application better.

Key words: night image enhancement; high pass filter; image fusion; adaptive weight

1 引言

随着平安城市系统、智慧城市系统的大规模建设,积累了大量的视频监控数据,为刑侦影像分析提供了大量影像数据。但是由于各监控系统性能差异较大,常常存在夜间时段采集的图像质量整体亮度低、像质退化严重的现象,大大降低了图像的应用价值^[1]。因此,对于夜间图像增强技术的研究具有重要意义。

图像增强是通过采取某种变换手段,突出图像中的目标细节,滤除无用信息,以便使处理后的图像能够更好地符合人眼的视觉特性。传统的图像增强法大体分为两类^[2-3]:空域法和频域法。空域法是直接对图像像素进行操作;频域法在图像的某个变换域内进行操作,再通过逆变换进行图像增强。常见的空域法主要有灰度变换(指数变换、对数变换、伽马变换等)、直方图均衡、直方图规定化等。频域法主要有高通滤波、低通滤波、带通滤波、同态滤波、小波变换等。随着研究的不断深入,衍生出了多种算法^[4-11],如基于色彩恒常性理论的 Retinex 方法、暗原色方法、偏微分方程法等。

夜间图像的主要特点是图像整体亮度较低,噪声干扰大,图像细节多淹没在较低灰度范围的背景中。灰度变换法虽然具有较好的实时性,但常常存在边缘细节与信噪比之间的矛盾。尤其对于夜间图像,由于含有较大的噪声干扰,在放大细节的同时也会导致隐含噪声随之放大。直方图均衡法是将灰度值以相等的概率分布在直方图上来扩展直方图的分布范围,然而它容易产生过增强,使图像过亮而使微弱信息丢失^[12]。基于 Retinex 理论增强算法、暗原色方法、偏微分方程等方法,在算法的实时性和普适性方面受到了较大限制^[13-14]。基于频域滤波的方法,既能有效地滤除

掉不需要的低频背景,又不会影响图像的高频细节,更不会造成噪声放大。因此,本文将基于频域的高通滤波作为夜间图像细节增强的基础方法。为了更好地满足人眼的视觉特点,本文还在滤波图像的基础上,与原始图像进行了像素级的权值自适应加权融合,使之在增强原有图像细节的同时又进一步增强了图像的整体对比度,显著提高了夜间图像的成像质量,且其良好的实时性,也使得整体提高安防监控水平成为可能。

2 算法原理

2.1 基于高通滤波的细节增强

夜间图像的大部分细节多淹没在低频暗背景中,为了进一步突出图像细节,而不至于扩大暗背景噪声,本文首先选用高斯高通滤波器进行暗背景滤除。高斯滤波器的传递函数如式(1)所示^[15]。

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

式中: $H(u, v)$ 为高斯滤波器频域传递函数, D_0 为截止频率, $D(u, v)$ 为频率域中点 (u, v) 与频率矩形中心的距离。

滤波前后效果对比图如图1所示。

由图1可以看出,滤除低频背景后的图像展现出了更多的图像细节(如图(b)中标示出的圆



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 滤波后图像

(b) Filtered image

图 1 高通滤波前后效果对比图

Fig. 1 Comparison of original and high pass filtering images

形区域内的车辆,以及其他若干背景车辆)。但是,从整体上看,滤波后图像的视觉对比度较差。这是因为,由于图像整体亮度较暗,目标灰度与背景灰度较为接近,即使进行了滤波处理,也不能将暗目标与背景完全区分开,导致滤波后的图像被整体“冲淡”,因此需要对图像作进一步的对比度增强。

2.2 基于自适应融合的对比度增强

如上节所述,由于夜间图像暗目标与背景灰度较为接近,常规的对比度增强方法^[15](如对数变换、伽马变换、直方图均衡等)可在加深背景的同时拉低目标亮度,也可在增加目标亮度的同时使背景灰度级随之增大。鉴于此,本文提出了一种基于像素级加权系数自适应的融合增强算法。

该算法将原始图像暗背景像素点与滤波图像的亮目标多细节像素点进行加权融合,即在平滑暗背景图像上进行有选择的增强目标的叠加,如式(2)所示。

$$G(x, y) = w_1 \cdot G_{A1}(x, y) + w_2 \cdot G_{A2}(x, y) \quad (2)$$

式中: $G(x, y)$ 为融合后像素点 (x, y) 的灰度值; $G_{A1}(x, y)$ 为原始图像中像素点 (x, y) 的灰度值; $G_{A2}(x, y)$ 为滤波图像中像素点 (x, y) 的灰度值; w_1 为 $G_{A1}(x, y)$ 的权重系数, w_2 为 $G_{A2}(x, y)$ 的权重系数, w_1 和 w_2 均为 0 到 1 之间的小数,且二者的和为 1。

由于 $G_{A1}(x, y)$ 与 $G_{A2}(x, y)$ 可以从图像中直接获取,那么权重系数 w_1 和 w_2 的合理选取将直接决定了最终的图像效果。

w_1 和 w_2 选取的指导思想是,像素点 (x, y) 灰度值越接近背景灰度,则原始图像对应像素点 (x, y) 值贡献应加大,其相应的权值 w_1 越大;而滤波图像对应像素点 (x, y) 贡献应削弱,其相应的权值 w_2 越小。像素点 (x, y) 灰度值越接近目标灰度时,则相反。由于夜间图像多数为暗背景亮目标图像,那么就可以将 w_1 表征为随灰度增强单调递减的函数,而 w_2 则表征为随灰度增加单调递增的函数,且始终保证二者的和为 1。

最简单的单调递增或递减函数是线性函数,由于线性函数会导致背景和暗目标同比例放大或缩小,因此不能较好地进行目标背景区分。而对数变换函数能够将较窄的低灰度值映射为较宽范围的灰度值^[15],进而能更好地区分暗背景和隐藏在暗背景中的较低灰度目标。因此,本文选取灰度值的对数归一化函数作为权重系数的变换公式。需要说明的是,为了避免 $G_{A2}(x, y) = 0$ 时,对数变换为负无穷大的情况,取对数时在原有灰度的基础上加上了偏置 1,如式(3)、式(4)所示,其变换曲线如图 2 所示。

$$w_2 = [\log(G_{A2}(x, y) + 1) / \log G_{\max}]^r \quad (3)$$

$$w_1 = 1 - w_2 \quad (4)$$

其中: $G_{\max}$ 为最大灰度值加 1,如 8 位图像,最大灰度值为 255,则 $G_{\max}$ 取值为 256。 r 为指数常数,经过实验效果比较,本文取值为 2。

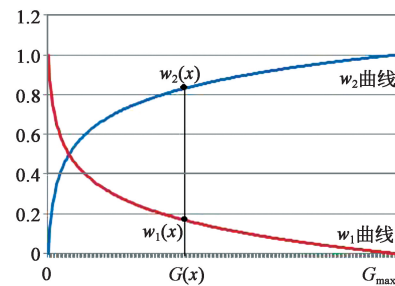


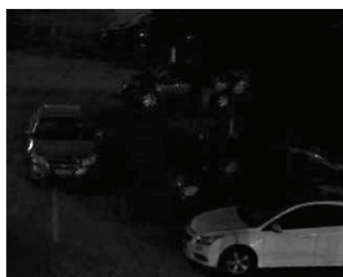
图 2 权重系数曲线

Fig.2 Curves of weight coefficient

图 3 为高通滤波图像与融合后效果对比图。从该对比图可以看出,融合后的图像对比度有所提高,但是由于滤波后图像整体亮度偏暗,导致整体对比度提升效果不够显著。因此,在融合过程中,应进一步提升滤波后图像在融合过程中的比例。将式(2)做进一步修正,得到式(5)。



(a)滤波后图像
(a) Filtered image



(b)融合后图像
(b) Fusion image

图3 融合效果对比图

Fig.3 Comparison of filtered and fusion images

$$G(x, y) = w_1 \cdot G_{A1}(x, y) + w_2 \cdot (G_{A2}(x, y) \cdot E), \quad (5)$$

式中, E 为微调修正系数, 一般选取大于 1 的数。此参量的选取应既能保证较好的图像对比度, 又不至于出现大量的饱和区域, 该参数可根据图像的饱和区域面积统计动态调整。本文中参数 E 取值为 4, 修正后的效果对比图如图 4 所示。

从效果对比图可以看出, 修正后的融合图像与滤波后图像相比, 对比度得到明显提升。与图 1 中原始图相比, 在图像细节和对比度方面均得到了显著提升, 且边缘过渡平滑。



(a)滤波后图像
(a) Filtered image



(b)融合修正后图像
(b) Modified fusion image

图4 融合修正效果对比图

Fig.4 Comparison of filtered modified fusion images

3 实验结果与分析

3.1 灰度图像增强效果主观评价

由于较常见的局部直方图均衡、直方图规定化、伽马校正等方法, 其处理结果与具体的增强策略、规定函数、参数选取的不同而存在较大差异, 难以一一比较。因此, 为了更好地验证融合增强算法的有效性, 本节将该算法与典型的直方图均衡和对数变换算法进行比较。同时, 除了上述较为常见的传统图像增强方法外, 也有学者提出将图像利用不同技术手段分别进行处理, 而进行图像融合, 并最终实现图像增强的方法。为了更好地验证融合增强算法的性能, 本节将与林晓春所提出的基于图像融合的图像增强手段进行比较^[16], 对比效果图如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出, 直方图均衡、对数变换和融合增强都使原始图在对比度和目标细节方面得到了明显改善, 但是经过直方图均衡和对数变换后的图像都出现了明显的边缘效应, 图像灰度变换不够细腻平滑, 整体增强效果不够理想, 而林晓春提出的算法增强效果在对比度方面较差,



(a)原始图像
(a) Original image



(b)直方图均衡
(b)Histogram equalization



(c)对数变换
(c)Logarithmic transformation



(d)融合增强(本文提出)
(d)Fusion enhancement proposed in this paper



(e)融合增强(林晓春提出)
(e)Fusion enhancement proposed by Prof. Lin

图 5 场景一增强效果对比

Fig.5 Comparison of enhancement in Scene 1



(a)原始图像
(a)Original image



(b)直方图均衡
(b)Histogram equalization



(c)对数变换
(c)Logarithmic transformation



(d)融合增强(本文提出)
(d)Fusion enhancement proposed in this paper



(e)融合增强(林晓春提出)

(e) Fusion enhancement proposed by Prof. Lin

图6 场景二增强效果对比

Fig.6 Comparison of enhancement in Scene 2

对于夜视环境下的图像处理能力较为有限。因此,从主观评价角度看,融合增强的增强效果较为显著。

3.2 灰度图像增强效果客观评价

常用的图像增强质量评价方法有对比度、信噪比、信息熵^[3]。由于信噪比在计算过程中要区分感兴趣的目标区域和背景区域,而对于不同应用场景(尤其是复杂场景)目标区域与背景区域较难定义,因此本节只采用图像的对比度和信息熵两项评价指标进行图像增强质量评价。

图像对比度的计算公式如下:

$$C_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=-k}^{n=k} \sum_{m=-k}^{m=k} |I_{i,j} - I_{i+m,j+n}|, \quad (6)$$

式中: $I_{i,j}$ 为中心像素点的灰度值, N 为图像局部块内像素点的个数, $C_{i,j}$ 为像素点 (i,j) 的局部对比度,全局对比度为 $C_{i,j}$ 均值。

图像信息熵计算公式如下:

$$H = - \sum_{k=0}^L p(k) \log(p(k)), \quad (7)$$

式中: $p(k)$ 为灰度级 k 的概率密度, L 为最大灰度级。

分别采用式(6)、式(7)计算图5中场景一和图6中场景二图像的对比度和信息熵指标,计算结果如表1和表2所示。

从表1和表2结果看出,相较于原始图像,传统的几种增强算法在对比度上都得到了明显提高,而和其他的融合增强算法进行比较,本文所提出的融合增强算法对比度数值更高。结合图5和图6可以看出,融合增强算法对比度从数值上略低于直方图均衡和对数变换,主要是因为前两种变换算法在变换后出现了明显的边缘效应,导致

局部对比度明显升高,进而造成对比度数值上的提高。这说明本文提出的融合增强算法更适用于夜间条件。而从信息熵评价结果看,直方图均衡和对数变换基本没有明显变化,而融合增强算法却得到了显著改善,但效果不如林晓春所提出的融合算法。总体上看,客观评价结果与3.1节的主观评价结果相吻合。

表1 场景一不同算法的图像质量评价结果

Tab.1 Results of image qualify evaluation with different algorithms in Scene 1

图像	对比度	信息熵
原始图像	0.73	4.09
直方图均衡	8.80	4.07
对数变换	5.16	4.09
融合增强(本文)	3.67	4.60
融合增强(林)	0.52	2.34

表2 场景二不同算法的图像质量评价结果

Tab.2 Results of image qualify evaluation with different algorithms in Scene 2

图像	对比度	信息熵
原始图像	1.11	4.97
直方图均衡	5.92	4.92
对数变换	1.79	4.96
融合增强(本文)	2.90	5.63
融合增强(林)	2.04	3.22

3.3 灰度图像实时性评价

对于在线图像处理设备,为了满足实际需要,算法的实时性也是衡量一种算法的重要指标。采用融合增强算法进行图像增强,对于 320×256 分辨率的灰度图像,CPU主频为3.0 GHz硬件环境下处理时间约为9.5 ms,足以满足标准的25 frame/s的视频输出间隔。且若要进一步提高算法实时性,可考虑提高计算机性能或采用GPU进行并行加速的解决办法。而与之相对应,对于同等条件下,林晓春所提出的图像融合算法的处理时间为7.1 ms,其图像处理效率快于本文所提出的图像融合增强算法。

3.4 彩色图像处理能力评价

由于夜视环境下,灰度图像更易进行处理,因

此被广泛应用于监控系统中。本文上述内容也主要针对灰度图像进行分析。但彩色图像在监控系统中也有应用,针对彩色图像的夜视图片,本文针对融合算法的处理能力进行了简单的探索和研究论证。在 CPU 主频为 3.0 GHz 硬件环境下,本文针对 320×256 分辨率的夜视监控彩色图像进行了处理,处理效果如图 7 所示。



(a)原始图像
(a)Original image



(b)融合增强(本文提出)
(b) Fusion enhancement proposed in this paper



(c)融合增强(林晓春提出)
(c)Fusion enhancement proposed by Prof. Lin

图 7 彩色图像增强效果

Fig.7 Enhancement of color image

由图 7 可见,本文提出的方法在对彩色图像进行处理时,能够较好地保证图像色彩不失真,图像灰度过度自然细腻,图像对比度明显。

与林晓春提出的增强算法相比,本算法增强效果更加显著。经融合增强处理后,图像的暗区域细节可见程度明显增加,对比度也明显提升。

彩色图像处理具体量化指标如表 3 所示。

表 3 彩色图像质量评价结果

Tab.3 Results of color image enhancement

图 像	对比度	信息熵
原始图像	3.04	5.51
融合增强(本文)	4.43	5.81
融合增强(林)	2.84	5.45

由表 3 可知,经融合增强算法处理后的彩色图像和原图像相比对比度有明显提升,而信息熵则与原图像处理结果相比基本持平,这也进一步证实了本算法在处理彩色图像时能够有效提升对比度,对图像暗区域细节具有较好的展示能力,适用于夜间图像曝光不足情况的处理。

3.5 扩展性评价

从算法的实现原理可知,本文提出的融合增强方法还可将其中的高频滤波部分替换为其他符合处理要求的增强算法进行自适应图像融合,以进一步提高算法的增强效果。

4 结 论

针对夜间图像曝光不足、对比度低的图像特点,本文提出了结合高通滤波和像素级权重系数自适应融合的方式进行图像增强的方法。该方法在对图像进行高通滤波的基础上,与原图进行变权重系数加权融合,既有效增强了图像细节又使图像对比度得到了显著提高。且图像对比度和信息熵两项评价指标均得到了明显改善,与主观评价趋势相符合。在算法的实时性方面,对于 320×256 分辨率的灰度图像,CPU 主频为 3.0 GHz 硬件环境下,本文的融合增强算法处理时间约为 9.5 ms,足以满足一般监控设备处理需求。此外,本算法还可将高频滤波替换为其他符合处理要求的增强算法,从而实现变系数融合增强,以适应不同图像场景和对处理时间的优化。因此,本算法的融合增强思想具有一定的灵活性和扩展性。

参 考 文 献:

- [1] 方明,李洪娜,雷立宏,等.低照度视频图像增强算法综述[J].长春理工大学学报:自然科学版,2016,39(3):56-64,69.
FANG M, LI H N, LEI L H, *et al.* A review on low light video image enhancement algorithms [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(3): 56-64, 69. (in Chinese)
- [2] 赵宏宇,肖创柏,禹晶,等.马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J].光学 精密工程,2014,22(4):1048-1055.
ZHAO H Y, XIAO C B, YU J, *et al.* A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1048-1055. (in Chinese)
- [3] 王浩,张叶,沈宏海,等.图像增强算法综述[J].中国光学,2017,10(4):438-448.
WANG H, ZHANG Y, SHEN H H, *et al.* Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
- [4] BHAT P, ZITNICK C L, COHEN M, *et al.* GradientShop: a gradient-domain optimization framework for image and video filtering [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(2): 10.
- [5] GONZALES A M, GRIGORYAN A M. Fast Retinex for color image enhancement: methods and algorithms [C]// *Proceedings of Mobile Devices and Multimedia: Enabling Technologies, Algorithms, and Applications* 2015. San Francisco, California: SPIE, 2015: 94110F.
- [6] 毛东月,谢正祥,贺向前,等.自适应双向保带宽对数变换及低照度图像增强[J].中国图像图形学报,2017,22(10):1356-1363.
MAO D Y, XIE Z X, HE X Q, *et al.* Adaptive bilateral logarithm transformation with bandwidth preserving and low-illumination image enhancement [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(10): 1356-1363. (in Chinese)
- [7] 郝志成,吴川,杨航,等.基于双边纹理滤波的图像细节增强方法[J].中国光学,2016,9(4):423-431.
HAO Z C, WU C, YANG H, *et al.* Image detail enhancement method based on multi-scale bilateral texture filter [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 423-431. (in Chinese)
- [8] 余春艳,徐小丹,林晖翔,等.应用雾天退化模型的低照度图像增强[J].中国图象图形学报,2017,22(9):1194-1205.
YU C Y, XU X D, LI H X, *et al.* Low-illumination image enhancement method based on a fog-degraded model [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(9): 1194-1205. (in Chinese)
- [9] XU H L, KUANG C, ZHANG L, *et al.* Range limited adaptive brightness preserving multi-threshold histogram equalization algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 726-736.
- [10] 王聪,杨晶,潘秀娟,等.基于光参量放大相位共轭特性的图像修复与增强[J].物理学报,2017,66(10):104205.
WANG C, YANG J, PAN X J, *et al.* Image restoration and enhancement based on phase conjugation of optical parametric amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(10): 104205. (in Chinese)
- [11] 张锐,贾娜.海域图像增强方法综述[J].液晶与显示,2017,32(10):828-834.
ZHANG R, JIA N. Sea image enhancement review [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(10): 828-834. (in Chinese)
- [12] 赵文达,续志军,赵建,等.基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J].光学 精密工程,2014,22(7):1962-1968.
ZHAO W D, XU Z J, ZHAO J, *et al.* Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1962-1968. (in Chinese)
- [13] 李红,吴炜,杨晓敏,等.基于主特征提取的 Retinex 多谱段图像增强[J].物理学报,2016,65(16):160701.
LI H, WU W, YANG X M, *et al.* Multispectral image enhancement based on Retinex by using structure extraction [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(16): 160701. (in Chinese)
- [14] 韩希珍,赵建.结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J].光学 精密工程,2012,20(6):1382-1388.
HAN X Z, ZHAO J. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1382-1388. (in Chinese)

- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. RUAN Q Q, RUAN Y Z, trans. 3rd ed. Beijing: Electronics and Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 林晓春, 李存志. 一种基于图像融合的红外图像增强新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2005, 32(2): 189-192, 215.
LIN X C, LI C Z. A new method for infrared image enhancement based on image fusion [J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(2): 189-192, 215. (in Chinese)

作者简介:



王 成(1983—),男,湖北枣阳人,工程师,2004 年于华中科技大学获得本科学位,主要从事测控技术方面的研究。E-mail:iailly@163.com