

低照度环境下视频增强技术

朴 燕, 刘 磊, 刘笑宇

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 在低照度环境下, 摄像机捕捉到的夜间视频质量较差, 常出现光照不足、对比度低、模糊不清和颜色偏移等问题, 影响了视频的判读和理解。针对夜间视频存在的问题, 提出不同时段空间背景融合技术和根据 Retinex 理论利用三边滤波器提取亮度图像的照度分量并结合 Sigmoid 非线性拉伸函数对反射分量进行增强处理以突出细节达到图像增强的目的。经实验证明, 提出的算法能够提高低照度夜间视频的整体视觉效果, 图像的亮度、对比度、清晰度得到改善, 突出了视频图像细节, 保留了视频重要内容, 增强结果自然清晰, 避免了图像失真等问题, 解决了夜间视频增强中常出现的光晕、鬼影、颜色偏移等问题, 便于视频的判读与分析。

关键词: 图像增强; Retinex 理论; 三边滤波; 图像融合

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-2021-06

Enhancement technology of video under low illumination

Piao Yan, Liu Lei, Liu Xiaoyu

(Electronic and Information Engineering Institute, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The picture quality of the video is very poor under the low illumination night environment, it often appears low contrast, blurred, color offset, etc, and it has influence on interpretation and understanding of the video. For solving the problem of nighttime video, the different time space background fusion technology was proposed based on moving object and a new Retinex image enhancement algorithm. This method improved the whole brightness and the contrast of the video through the strategy of adaptive brightness adjustment. Then the illumination components of brightness images were extracted by the trilateral filter based on the theory of Retinex. The reflecting components of images were obtained through compressing illumination. It was because that the reflecting components of images included large number of particulars and marginal information of images, reflecting components were enhanced through integrating Sigmoid non-linear stretching function. At last, it enhanced the saturation component to get more bright colors. The experiments show that the algorithm can improve the visual effect of the low illumination video at nighttime. The image brightness, contrast, sharpness is improved, and the method not only enhanced the video image detail, but also retained the important content of the video. The method avoid the distortion of images, such as, halo, ghost, color deviation.

Key words: image enhancement; Retinex theory; trilateral filter; image fusion

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-15

基金项目: 吉林省科技厅资助项目(20110355)

作者简介: 朴燕(1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事立体成像及数字视频图像处理方面的研究工作。

Email: piaoyan66@126.com

0 引言

在计算机视觉中,视频增强是一种重要的处理技术^[1-2]。在低照度环境下(如夜间)所获得的视频序列,由于噪声大、对比度低、颜色信息少,希望通过一种图像增强手段既能清晰看到整幅图像,又能突出局部细节,目前传统图像增强算法很难做到很好地兼顾。

因此,文中针对动态背景和静态背景的夜间视频分别提出了基于 Retinex 理论的增强方法和基于图像融合的增强方法,这两种算法能够解决夜间视频增强中常出现的光晕、鬼影、颜色偏移等问题,能够达到令人满意的效果。

1 基于 Retinex 理论增强算法

对于动态背景夜间视频,文中提出了基于 Retinex 理论增强方法。首先,利用自适应全局亮度调节函数来调整图像的亮度;然后,将图像由 RGB 空间转换到 HSV 空间,利用三边滤波器来提取亮度图像的照度分量,对照度分量进行压缩获得反射分量,并对反射分量进行 Sigmoid 非线性拉伸处理以增强图像的局部对比度和细节可见度;最后,通过增强饱和度分量来恢复图像的颜色,并将图像转换到 RGB 颜色空间。

1.1 全局亮度调整

由于夜间视频图像存在大量高光区域和黑暗连通区域,图像亮度反差大,因此文中采用基于对数映射的自适应亮度调节方法,即按照亮度将夜间图像分成亮区和暗区两个部分,然后分别对这两个区域的亮度进行非线性调节。该方法可以拉伸高光区域和黑暗区域的动态范围,增强淹没在高光和黑暗区域的细节,同时压缩中间的灰度级。表达式如下:

$$m\log[I(x,y)] = \begin{cases} W_L \cdot \log[I(x,y)] + 1 & I(x,y) \leq T \\ -W_H \cdot \log[D - I(x,y)] + \log D & I(x,y) > T \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_L 与 W_H 分别代表亮区和暗区的权值,即 $W_L = \frac{(T/(D-1)) \cdot \log D}{\log(T+1)}$, $W_H = \frac{[1-(T/(D-1))] \cdot \log D}{\log(D-T)}$; D 为灰度级的动态范围,对于 8 位的图像而言,其值取 256; T 为分割亮区和暗区的阈值,当 $T=D-1$ 时,自

适应的亮度调节函数就化为一般的对数算子。

1.2 局部细节增强

对于图像局部细节的增强,关键部分是利用三边滤波器提取亮度图像的照度分量,同时,结合 Sigmoid 非线性拉伸函数对图像的反射分量进行增强处理能够突出局部细节和对比度,如图 1 所示。

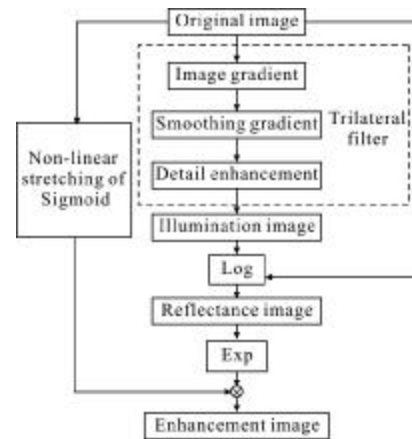


Fig.1 Flow chart of local details enhancement algorithm

Choudhury 等人^[3]在双边滤波器的基础上提出了三边滤波器,三边滤波器是除了空间位置和亮度外,又引入了图像的梯度信息,具有“梯度保持”特性,因此能够精确区分基本层和细节层。双边滤波器的滤波窗口为矩形,而三边滤波器使用倾斜的滤波窗口。三边滤波器主要包括两步,每一步都是经修改的双边滤波。

第一步是梯度滤波。计算输入图像 I 的梯度 ∇I ,这里使用前向差分计算梯度,对 ∇I 进行双边滤波得到较平滑的梯度:

$$G_\theta(x) = \frac{1}{k_\theta(x)} \int_{-\infty}^{\infty} \nabla I_{in}(\zeta) c(\zeta-x) s(\|\nabla I_{in}(\zeta) - \nabla I_{in}(x)\|) d\zeta \quad (2)$$

$$k_\theta(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\zeta-x) s(\|\nabla I_{in}(\zeta) - \nabla I_{in}(x)\|) d\zeta \quad (3)$$

第二步是细节滤波。使用倾斜的滤波窗口,对每一个像素 x ,倾斜角度为 $G_\theta(x)$,亮度域核函数衡量邻域内每一个像素 ζ 到滤波窗口中轴的距离,这与原始的双边滤波器不同。根据 $G_\theta(x)$ 计算其邻域内每一个像素 ζ 的估计值 $P(x,\zeta)$,即

$$P(x,\zeta) = I_{in}(x) + G_\theta(x) \cdot (\zeta - x) \quad (4)$$

定义 ζ 处的局部细节值 $I_\Delta(x,\zeta)$ 为像素 ζ 实际值和估计值的差, $I_\Delta(x,\zeta)$ 实际就是 ζ 到滤波窗口中轴的距

离:

$$I_{\Delta}(x, \zeta) = I_{in}(x) - P(x, \zeta) \quad (5)$$

像素 x 经三边滤波的最终结果:

$$TF(I_{out}(x)) = I_{in}(x) +$$

$$\frac{1}{k_{\Delta}(x)} \int_{-\infty}^{\infty} I_{\Delta}(x, \zeta) c(\zeta - x) \cdot s(I_{\Delta}(x, \zeta) f_{\theta}(x, \zeta)) d\zeta \quad (6)$$

$$k_{\Delta}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\zeta - x) \cdot s(I_{\Delta}(x, \zeta) f_{\theta}(x, \zeta)) d\zeta \quad (7)$$

式中: $f_{\theta}(x, \zeta)$ 为取值为 0 或 1 的二值函数, 若像素 ζ 与像素 x 的梯度差异过大, 则在对 x 滤波时忽略 ζ 。 $f_{\theta}(x, \zeta)$ 定义为:

$$f_{\theta}(x, \zeta) = \begin{cases} 1, & \text{若 } \|G_{\theta}(\zeta) - G_{\theta}(x)\| < R \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其次, 基于中心环绕的 Retinex 模型通过三边滤波方法估计亮度图像的照度分量后可获取图像的反射分量, 反射分量反映了图像的本质。设 $\log(R) = r$, $\log(I_v) = s$, $\log(TF(I_{out})) = l$, 则反射分量的表达式如下:

$$\log(R) = \log(I_v) = \log(TF(I_{out})) \quad (9)$$

$$r = s - l \quad (10)$$

$$\hat{R} = \exp(r) \quad (11)$$

式中: I_v 为输入图像的亮度图像; $TF(I_{out})$ 为利用三边滤波器估计的照度图像; \hat{R} 为反射图像。由于反射图像包含图像的大量细节, 对获取的反射图像进行增强处理可以突出图像细节和边缘信息。文中提出使用 Sigmoid 非线性拉伸函数^[4](“S”型函数)对反射分量进行处理, 其具有锐化图像、突出局部细节和拉伸图像对比度的作用。数学表达式如下:

$$I_{\text{sigmoid}} = b \times I_v + c \times I_v \times 1 / (1 + \exp(-I_v)) \quad (12)$$

$$\hat{R}_{out} = \hat{R} \times I_{\text{sigmoid}} \quad (13)$$

式中: I_{sigmoid} 为亮度图像进行 Sigmoid 非线性拉伸的结果; \hat{R} 为初始反射图像; \hat{R}_{out} 为增强的反射图像; b 和 c 为常数, 根据图像特点, 选择合适的常数。

1.3 饱和度增强

当对图像的亮度分量增强后, 图像的饱和度出现偏低的现象, 因此, 基于 HSV 空间, 文中采用饱和度增强算子以获取更鲜亮的颜色, 表达式为:

$$S' = S^{\gamma} \quad (14)$$

式中: S 和 S' 分别表示增强前与增强后的饱和度; γ 为拉伸系数, 用于控制饱和度增强的程度, γ 一般取

0.5~1 之间的值。当处理完饱和度分量后, 再将图像由 HSV 空间转换到 RGB 颜色空间, 就获得夜间视频的增强结果。

2 基于图像融合增强方法

对于夜间监控视频, 文中提出了一种基于图像融合的增强方法, 该方法通过融合同一地点不同时间拍摄的白天图像, 并利用运动物体提取技术、亮度估计理论加权处理等方法得到融合图像。由于受天气或拍摄时间等因素的影响, 拍摄的白天视频图像可能出现亮度不足的情况, 若将低质量的白天图像与夜间视频图像融合, 则获取的融合图像同样存在亮度过暗、质量不佳的问题。为了改善图像的视觉效果, 将指数映射函数应用到融合图像中, 在图像亮度和对比度提高的同时不会模糊运动物体, 局部对比度也得到了改善, 具有一定的保真度。图 2 为文中提出的图像融合增强算法的流程图。

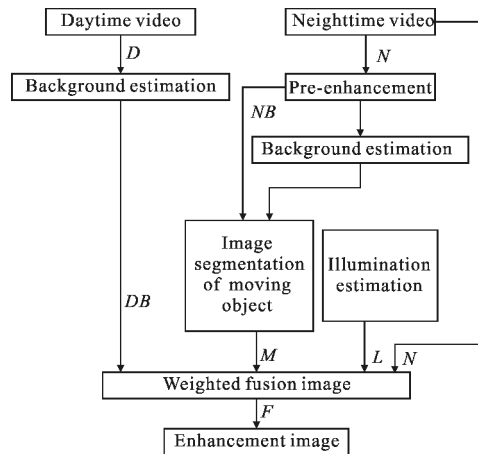


图 2 文中基于图像融合增强算法的流程图

Fig.2 Flow chart of image fusion enhancement algorithm

2.1 背景估计

在提取视频背景前可以先对原始夜间视频图像进行预增强处理, 而后采用基于帧间差分的背景建模方法^[5]。

首先顺序读入视频的每一帧, 然后对帧做灰度化处理, 则某像素点 (x, y) 在时间 t 上的灰度值表示为 $F(x, y, t)$ 。将相邻两帧做差分, 获得二值图像 $D(x, y, t)$, T 为阈值, 如公式(15)所示:

$$D(x, y, t) = \begin{cases} 255 & |F(x, y, t) - (x, y, t-1)| \geq T \\ 0 & |F(x, y, t) - (x, y, t-1)| < T \end{cases} \quad (15)$$

然后采用形态学区域填充算法对帧间差分后得到的内部有黑色孔洞的连通区域进行填充,找到完整的运动区域,然后将位于运动区域的像素值丢弃,而只对位于非运动区域的像素值进行累加, $i=i+1$,返回公式(15)进行迭代,当迭代一定次数后结束迭代,可以通过求平均获得背景图像,公式如下:

$$\text{Sum}(x,y)=\begin{cases} \text{Sum}(x,y)+F(x,y,t_i) & D(x,y,t_i)=0 \\ 0 & D(x,y,t_i)=255 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Num}(x,y)=\begin{cases} \text{Num}(x,y)+1 & D(x,y,t_i)=0 \\ 0 & D(x,y,t_i)=255 \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{B}(x,y)=\text{Sum}(x,y)/\text{Num}(x,y) \quad (18)$$

式中: $\text{Sum}(x,y)$ 为非运动区域的累加值; $\text{Num}(x,y)$ 为非运动区域的累加次数; $\text{B}(x,y)$ 为求得的背景图像。

当得到初始背景后,背景会随着时间的推移存在一定的变化,因此要对背景进行更新,方法是:若在当前帧和背景图像做差分后得到的差分图像中,发生变化的像素数与全部像素数的百分比大于某一个阈值(通常取 80%),则背景发生了大范围的变化,若连续多帧中这一比值依然很大,则按文中背景提取算法重新提取背景。图 3 分别展示了夜间和白天视频图像的背景估计结果。

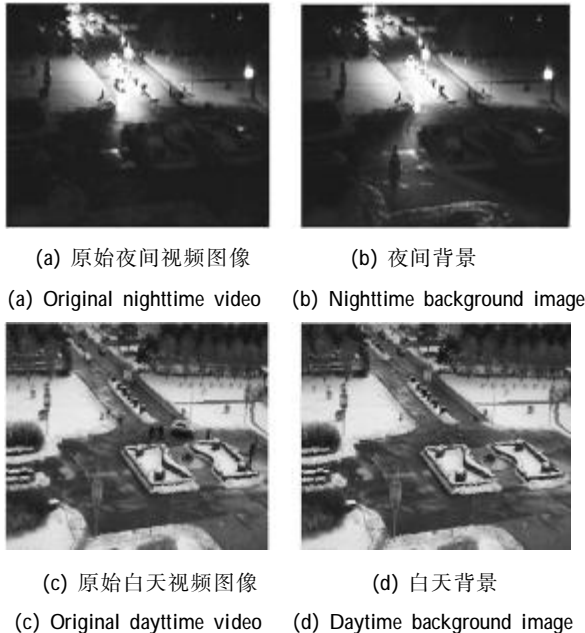


图 3 背景估计

Fig.3 Background estimation

2.2 运动物体分割

考虑到夜间视频图像中不同区域的照明强度各

不相同,在运动目标分割中使用相同的阈值很不合适,因此,文中根据夜间图像的亮度分布采用不同的阈值进行运动物体的分割。

首先,采用直方图均衡化方法对 HSV 空间的亮度图像进行处理。像素根据亮度被分成 M 个等级,表达式如下:

$$\text{G}(x,y)=M \cdot f(m), m=1, \dots, M \quad (19)$$

式中: $f(m)=\sum_{x=0}^{x=m} P(x)$, $P(x)$ 表示像素的概率; $\text{G}(x,y)$ 将会近似到最近的整数。

其次,运动物体分割可表示为:

$$\text{M}(x,y)=\begin{cases} 1 & |\text{N}_{(x,y)}(\text{R})-\text{NB}_{(x,y)}(\text{R})|>\text{T}(m), \text{或} \\ & |\text{N}_{(x,y)}(\text{G})-\text{NB}_{(x,y)}(\text{G})|>\text{T}(m), \text{或} \\ & |\text{N}_{(x,y)}(\text{B})-\text{NB}_{(x,y)}(\text{B})|>\text{T}(m) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\text{T}(m)$ 为亮度等级 m 上的阈值,且 $m=\text{G}(x,y)$ 。运动分割的结果如图 4 所示。

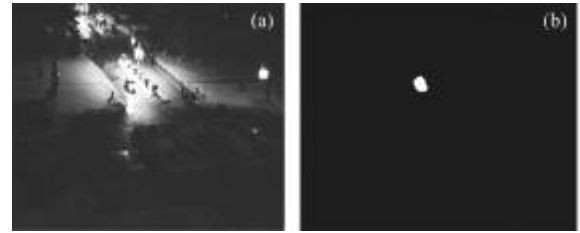


图 4 运动物体分割

Fig.4 Moving object segmentation

2.3 亮度提取

采用 Retinex 理论进行图像亮度估计^[6],亮度特征 L 采用高斯低通滤波器来估计,即 $L=K*I$,其中, K 为高斯核, I 为原始输入图像, $*$ 表示卷积运算, L 为亮度估计值。在实际应用中,需要对亮度估计值进行归一化处理,表达式如下:

$$\text{L}(x,y)=\frac{\text{L}(x,y)-\min(\text{L}(x,y))}{\max(\text{L}(x,y))-\min(\text{L}(x,y))} \quad (21)$$

2.4 加权融合图像

文中通过结合高质量的白天图像来恢复夜间视频内容。首先估计权值 W ,然后利用权值 W 对白天背景图像和夜间视频每一帧进行加权融合,表达式如下:

$$\text{W}(x,y)=\begin{cases} 1 & \text{M}(x,y)+\text{L}(x,y)\geq 1 \\ \text{L}(x,y) & \text{M}(x,y)+\text{L}(x,y)< 1 \end{cases} \quad (22)$$

$$F=W \times N+(1-W) \times DB \quad (23)$$

式中: $W(x,y) \in [0,1]$; F 为加权融合图像; N 为夜间图像; DB 为白天背景图像。

2.5 指数映射函数的应用

为了解决由于获取的白天图像亮度过低而造成融合图像亮度过暗的问题,文中将指数映射函数应用到加权融合图像中。由实验结果可知,指数映射函数的应用不仅提高了图像的亮度和局部对比度,而且运动物体清晰可见。指数映射函数定义如下:

$$y=255 \times \left(a \times \left(\frac{x}{255} \right)^b \right) \quad (24)$$

式中: y 为输出的增强图像; x 为加权融合图像; a 为控制图像亮度的参数; b 为控制图像对比度的参数,参数 a 和 b 可以根据图像特点自行设置。指数映射的算法结果如图 5(b)所示,此方法与加权融

合算法(图 5(a))比较,对图像的部分细节增强较为明显。



(a) 加权融合图像 (b) 指数映射增强图
(a) Weighted fusion image (b) Power-law transformation

图 5 指数映射函数的应用

Fig.5 Application of index mapping function

3 实验结果分析

如图 6 所示,基于 Retinex 理论的夜间视频增强算法在亮度、清晰度和对比度上都优于双边滤波方



图 6 夜间视频增强算法比较

Fig.6 Comparison between enhancement algorithm of night video

法,边缘信息清晰,色彩自然鲜亮,达到了较好的视觉效果,通过三边滤波器提取照度能够避免光晕效应,而双边滤波方法则出现了较为严重的光晕现象。文中的基于图像融合的夜间视频增强算法则通

过合适的融合规则和技术恢复了夜间视频的场景信息,不仅图像的亮度、局部对比度得到提高,同时避免了 Li's 算法中出现的鬼影现象(圆圈标记),画面非常清晰。

4 结 论

文中主要针对低照度环境下的夜间视频增强算法进行了研究。经实验证明,提出的算法能够提高低照度夜间视频的整体视觉效果,图像的亮度、对比度、清晰度得到改善,突出了视频图像细节,保留了视频重要内容,增强结果自然清晰,避免了图像失真等问题,便于视频的判读与分析,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] Li Min, Zhou Zhenhua, Zhang Guillin. Image measures in the evaluation of ART algorithm performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 412-416. (in Chinese)
李敏, 周振华, 张桂林. 自动目标识别算法性能评估中的图像度量[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 412-416.
- [2] Wang Jinsong, Yan Yian, Wei Fajie. Moving object detection method using background Gaussian kernel density estimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 373-382. (in Chinese)
王劲松, 颜益安, 魏法杰. 利用背景高斯核密度估计的运动目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 373-382.
- [3] Prasun Choudhury, Jack Tumblin. The trilateral filter for contrast images and meshes [C]//Eurographics Symposium on Rendering, 2003: 1-11.
- [4] Braun G J, Fairchild M D. Image lightness rescaling using sigmoidal contrast enhancement functions [J]. *Journal of Electron Imaging*, 1999, 8: 380-393.
- [5] Fan Xiaoliang, Yang Jinji. The background extraction and update algorithm based on frame difference [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(22): 159-161. (in Chinese)
樊晓亮, 杨晋吉. 基于帧间差分的背景提取与更新算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(22): 159-161.
- [6] Ramesh Raskar, Adrian Ilie, Jingyi Yu. Image fusion for context enhancement and video surrealism[C]//Proceedings of SPIE: Image Sensors, 2004, 3965: 392-401.
- [7] Fredo Durand, Julie Dorsey. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images [C]//Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2002, 21(3): 249-25.
- [8] Jing Li, Stan Z Li, Quan Pan, et al. Illumination and motion-based video enhancement for night surveillance[C]//Proceedings 2nd Joint IEEE International Workshop on VS-PETS, 2005.