

文章编号: 1007-2780(2012)03-0385-06

基于人眼视觉灰度识别特性的 图像动态范围小波变换处理方法

唐艳秋^{1,2}, 张星祥¹, 李新娥¹, 任建岳^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: woshitangyanqiul@126.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 常用的图像传感器由于电荷耦合器(CCD)和模数转换器(ADC)的限制, 动态范围大约只有 60 dB, 与人眼的动态范围(110 dB)不符, 导致获取的图像丢失部分细节信息。针对这一问题, 提出了基于小波变换的图像动态范围扩展技术。通过对同一场景进行多次拍摄, 获得不同曝光时间的源图像, 对源图像运用多尺度小波变换分解为高频部分和低频部分。将基于人眼的视觉灰度识别特性的方法应用于低频部分的处理中, 运用不同的权重值进行处理, 尽可能保留图像的背景信息。对高频部分运用局部最大方差准则进行融合, 尽量保留图像的边缘特性。将融合后的高频部分和低频部分利用逆小波变换进行重构。试验结果表明, 重构后的图像与适度曝光的图像相比, 在高亮度区域和低亮度区域的细节信息得到了复原, 动态范围得到了显著的扩展。

关 键 词: 动态范围; 小波变换; 图像融合

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122703.0385

Image Processing Method of Dynamic Range With Wavelet Transform Based on Human Visual Gray Recognition Characteristics

TANG Yan-qiu^{1,2}, ZHANG Xing-xiang¹, LI Xin-e¹, Ren Jian-yue^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: woshitangyanqiul@126.com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Due to a CCD and ADC restriction, the dynamic range of the commonly used image sensor is only about 60 dB, which does not coincide with the dynamic range(110 dB)of eyes, leading to the loss of partial details of the image. In this paper, an image extended dynamic range technique based on the wavelet transform would be proposed. By means of taking pictures of the same scene repeatedly, the source images of different exposure time were procured, which were further divided into high frequency part and the low frequency part by using multi-scale wavelet transform. The method based on human visual gray recognition features was applied to the processing of low frequency part. By using different weights for processing, the most background information possible of the image was retained. For the high frequency part, the local maximal variance criteria for fusion was used to maintain the image edges' characteristics to the greatest extent. Reconstruction is proceeded by using

收稿日期: 2012-02-29; 修订日期: 2012-03-19

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划(No. 863-2-5-1-13B)

作者简介: 唐艳秋(1986—), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CCD 图像采集与处理。

* 通讯联系人, E-mail: reny@sohu.com

inverse wavelet transform to the merged high frequency part and low frequency part. Test results showed that comparing the reconstructive image and moderately exposed image, the details of information in the high brightness area and low light area was recovered, and the dynamic range got significant expansion.

Key words: dynamic range; wavelet transform; image fusion

1 引 言

自然场景的亮度包含很大的动态范围,从夜空中闪烁的星光(亮度约为 0.001 cd/m^2)到耀眼的太阳光(亮度约为 $1\,000\,000 \text{ cd/m}^2$),亮度范围涵盖了 9 个数量级的动态范围。通过人眼的自动调节能力,在同一时间内能够分辨的动态范围大约为 110 dB,而普通的图像传感器由于 CCD 和 ADC 的限制,动态范围大约只有 60 dB,这就使得图像传感器拍摄到的图像不能完全反应真实的场景,在强背景光下传感器过曝,丢失高亮度区域的细节信息;在暗背景下曝光不足而无法分辨。

目前扩展图像传感器动态范围的方法有很多种,其中应用最广泛的是 1962 年 Wyckoff 提出的多次曝光法^[1]。Wyckoff 通过不同的胶卷对同一场景进行了不同快门速度的曝光,获得一系列图像。1993 年, Mann 提出了数字化的多次曝光技术,通过多次曝光获得图像之后,通过一个确定函数(由相机的响应函数推导出来)对图像进行融合,获得高动态范围图像^[2]。1994 年, Tumblin 和 Rushmeier 提出了一种线性的全局算法,该算

法基于人眼的视觉系统(HVS)灰度识别特性,能使观察者对显示图像和真实场景的亮度在主观感觉上保持一致,算法简单易于实现^[3]。1989 年, Mallat 利用多分辨率分析的概念,提出了 Mallat 快速小波变换与重构算法^[4],之后小波变换在图像处理领域得到了广泛的应用。

本文将小波变换与基于人眼的视觉灰度识别特性的方法相结合,利用两幅曝光时间不同的图像,利用小波变换分解为高频部分和低频部分,将基于人眼的视觉灰度识别特性的方法应用于低频部分的处理中,获得了比直接使用基于人眼的视觉灰度识别特性的方法边缘特性更好的图像。

2 实 验

2.1 试验装置

本实验采用自行设计的成像系统来获取图像,该成像系统使用 Sony 公司的 ICX415AL 行间转移型面阵 CCD 芯片,有效像素为 782×582 ,该芯片具有可变电子快门,通过改变电子快门控制信号 SUB 可以改变曝光时间,从而获得不同曝光时间的图片。CCD 在 FPGA 的驱动下,完成感



图 1 曝光时间不同的图像。(a)曝光时间为 $100T$,能清晰看清灯管的轮廓,但丢失低亮度细节信息;(b)适度曝光图像,曝光时间为 $300T$;(c)曝光时间为 $500T$,实验桌上的物品清晰可见,但灯管轮廓细节丢失。

Fig. 1 Images of different exposure time. (a) Outline of flashlamp is clearly observed as exposure time is $100T$, but losing the detail information of low luminance; (b) Moderate exposure image is obtained as exposure time is $300T$; (c) Objects on the bench is clearly observed as exposure time is $500T$, but losing the outline of flashlamp's detail information.

光、转移、输出等过程,输出的模拟信号经过图像采集芯片 VSP2230 进行相关双采样、暗电平嵌位和模数转换之后输出 10 位数字信号,经图像采集卡采集之后即可成像,如图 1 中所示,其中 T 为每像素输出时间,系统采用 29.5 MHz 的时钟,因此 $T=1/(29.5 \times 10^6)$ s。

2.2 算法原理

设 $c_0, (m, n)$ 为图像上任意一点,像素值为 $c_0(m, n)$ 。对给定的尺度函数和小波函数,根据 Mallat 提出的小波分解与重构快速算法,可将图像分解成低频部分和高频部分。低频部分主要包含背景信息,反映了原始图像近似和平均特性,决定了图像的大体轮廓;高频部分反映了图像的细节信息,对保留图像的边缘等特征具有重要作用。对低频部分和高频部分分别采用不同的融合规则,则可获得高动态范围的图像。

2.2.1 高频子带融合

高频部分反映了图像的细节信息,本文采用局部方差最大准则进行融合^[5]。方差可用来对对比度进行测度,采用局部方差最大准则进行融合可以尽可能保留图像的细节信息。本文采用 3×3 的像素范围来进行计算,表达式如下:

$$d_{j+1}^o = \begin{cases} Ad_{j+1}^o \sigma(A, \rho) \geq \sigma(B, \rho) \\ Bd_{j+1}^o \sigma(A, \rho) < \sigma(B, \rho) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $o=h, v, d$, 分别代表水平、垂直、对角线高频分量, $j+1$ 表示分解的级数, A, B 表示两幅源图像, ρ 为高频分量中任意一点, σ 指邻域方差。

2.2.2 低频子带融合

低频部分的融合目前采用比较多的主要是平均法,这种方法虽然也可以扩大动态范围,但会使每幅图像中原来细节清晰的部分因为平均而变得

模糊,导致重构后的图像效果不佳。本文将基于人眼的灰度识别特性的方法^[3,6-7]应用于低频部分的处理,采用加权平均法重构低频部分,对两幅图像中置信度高的像素给予较大的权重值,置信度低的像素则分配较小的权重值,采用这种方法融合以后的图像能更好地保留两幅图像原有的细节信息。假设两幅图像分别为 c_{j+1}^A 和 c_{j+1}^B , c_{j+1} 为融合后的低频子图像,则可表示为:

$$c_{j+1} = \alpha \cdot c_{j+1}^A + (1 - \alpha) \cdot c_{j+1}^B \quad (2)$$

α 表示权重值,它的取值基于人眼的视觉灰度识别特性,如图 2 所示^[6],人眼在灰度值很低或者很高的情况下,对灰度的分辨能力很差,在灰度适中的情况下,分辨能力提高。因此在灰度级很低和很高的区域,可将灰度值间隔拉伸,使人眼更好分辨;在中间灰度时则进行一定的压缩,将剩余灰度级分配给低灰度级和高灰度级,由图 2 可知,在 32~192 这个区域内,人眼的分辨能力较强,因此选定两个边界值 $T_{\min} = 32$ 和 $T_{\max} = 192$, 将这幅图划分成 3 个区域,采用不同的加权方法进行合成,如表 1 所示^[7]。

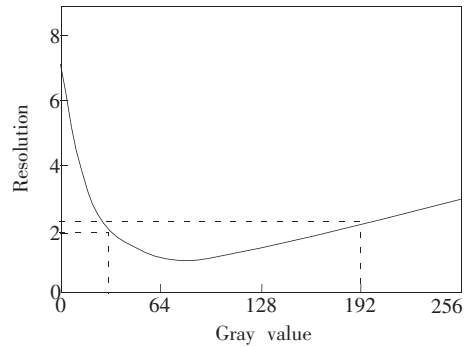


图 2 人眼对灰度的分辨能力

Fig. 2 Resolving ability to the grayscale of human eyes

表 1 图像分段合成策略

Table 1 Image synthesis with sub-section weight

Judgment condition	Choosing right ($\sum \alpha = 1$)
$(c_{j+1}^A + c_{j+1}^B) / 2 < 32$	$\alpha = 0.5 \times [(c_{j+1}^A + c_{j+1}^B) / 2] / 32$
$32 \leq (c_{j+1}^A + c_{j+1}^B) / 2 \leq 192$	$\alpha = 0.5$
$(c_{j+1}^A + c_{j+1}^B) / 2 > 192$	$\alpha = 1 - 0.5 \times [256 - (c_{j+1}^A + c_{j+1}^B) / 2] / 64$

3 结果与讨论

融合后的图像效果与源图像的数量、小波分解的级数、小波函数的选择以及融合算法等

有关。曝光不同的源图像越多,包含的细节信息越丰富,融合后的图像越接近真实场景;分解级数越多,可以尽可能多的保持图像清晰区域的主要细节特征;小波函数的选择以及融合算

法则对融合后的图像质量起着决定性的作用。本文主要从小波函数的选择进行讨论,同时与单一图像动态范围扩展方法进行对比,得出结论。

3.1 基于不同小波函数的融合

下文采用图 1 中(a)、(c)两幅源图像,分解级数为 2,分别选用“meyer”小波、“db6”小波和“haar”小波进行处理,小波函数图形如图 3 所示。图 3(a)的 Meyer 小波函数为正交、双正交小波函数,它是由 Meyer 于 1986 年提出的, Meyer 小波不是有限支撑的,但其有效的支撑范围在 $[-8, 8]$ 之间,具有对称性和非常好的规则性; db 小波是

由法国女学者 Ingrid Dauechies 于 90 年代初提出并构造的, dbN 中的 N 表示 db 小波的阶次, $N=2\sim 10$,当 $N=1$ 时, db1 即是 Haar 小波, db 小波是正交小波,也是双正交小波,并且是紧支撑的,由图 3(b)可看出, db 小波具有非对称性; Haar 小波由数学家 Haar 于 1910 年提出的,它在时域是紧支撑的,只能在 $(0, 1)$ 之间取值,具有对称性,是目前惟一个既具有对称性又是有限支撑的正交小波,由于 Haar 小波只能取 $+1$ 和 -1 ,因此计算比较简单。使用 3 种不同小波函数处理以后的图像如图 3(d)、(e)、(f)所示,通过比较对应的局部细节图可发现,采用 Haar 小波处理的

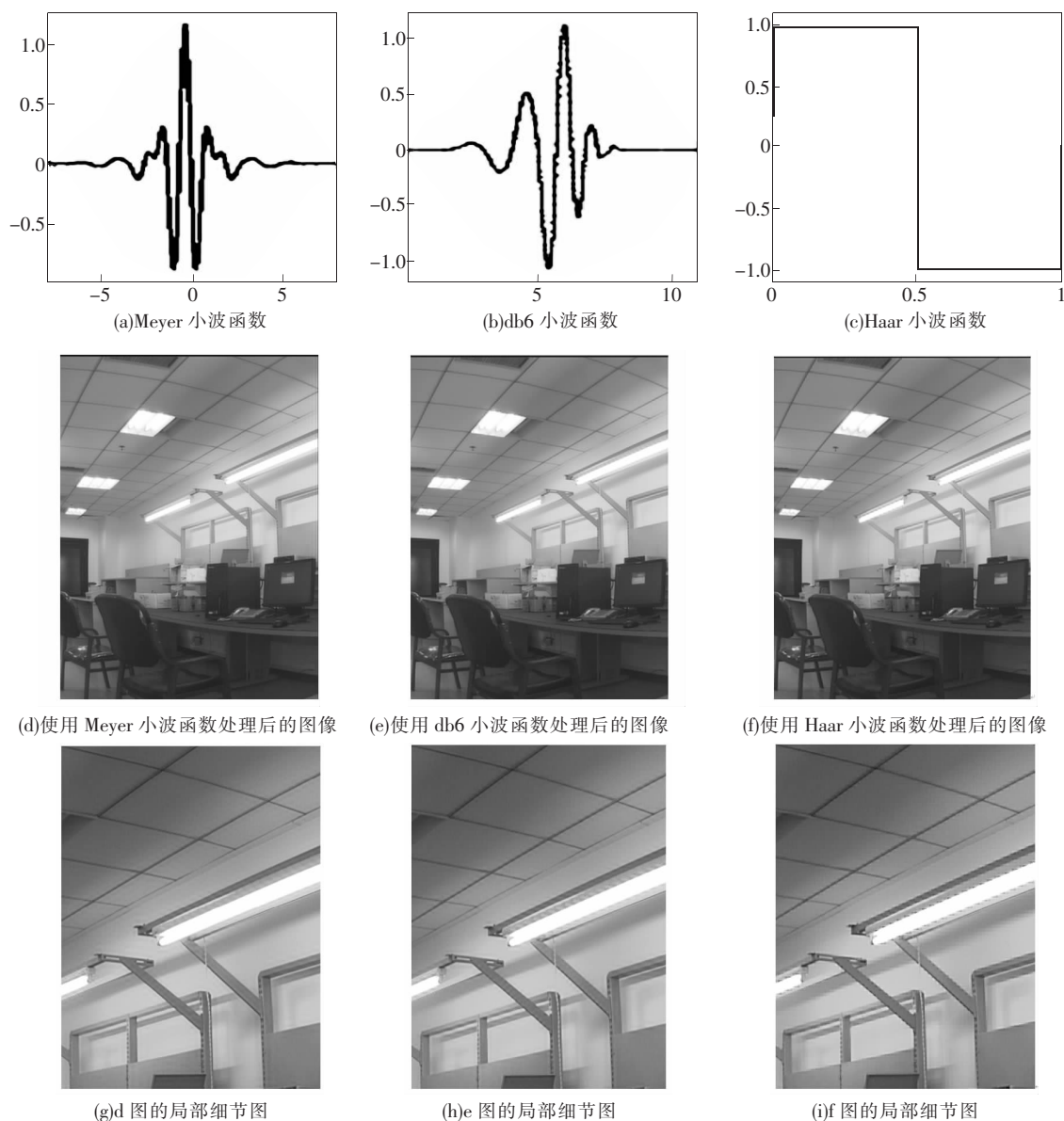
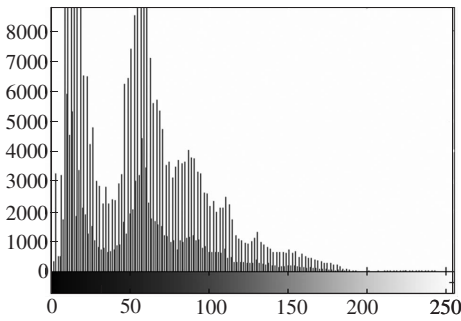


图 3 小波函数的波形图及处理后的图像

Fig. 3 Wavelet graphs and images after processed

图像(i)灯管边缘出现了明显的锯齿状的波纹,这是由 Haar 小波的阶跃性决定的。图 3(h)比(i)效果要好得多,边缘比较平滑,但仍然能看到一些杂纹。效果最好的是使用 Meyer 小波处理后的图像,由图 3(g)可以看到,灯管边缘轮廓非常清晰,线条很光滑,没有锯齿波和杂纹的出现,这是由于 Meyer 小波具有非常好的规则性,因此重构时能尽可能的逼近源图像。由此可得出,采用 Meyer 小波进行处理可以获得比另两种小波更好的图像。



3.2 单一图像法与多曝光法

对适度曝光图像(图 5(a))进行计算并绘制直方图,结果如图 4(a)所示,可见,源图像的灰度级主要集中在 0~100 之间,直方图的“宽度”相对于整个灰度范围来说非常狭窄,因而其较低动态范围较为明显。对其进行直方图均衡化,使灰度级均衡地分布在整个灰度范围内(图 4(b))。进行直方图均衡化后的图像(图 5(b))平均亮度及对比度明显增强,较暗区域的细节信息得到了体现(图 5 中 B 区),但亮处的细节信息却无法复原(图

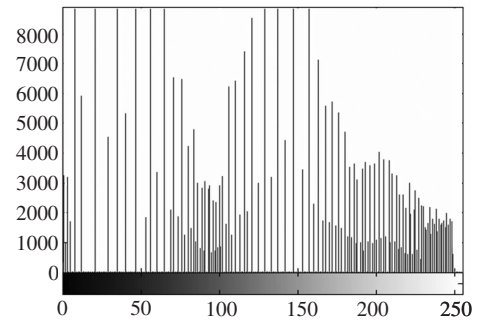
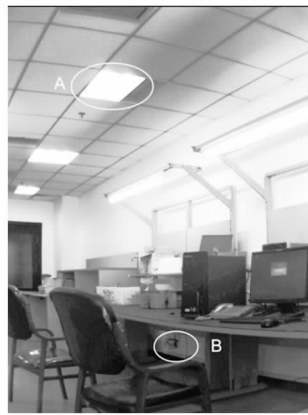


图 4 图像的直方图。(a)原图像的直方图;(b)进行均衡化后的直方图。

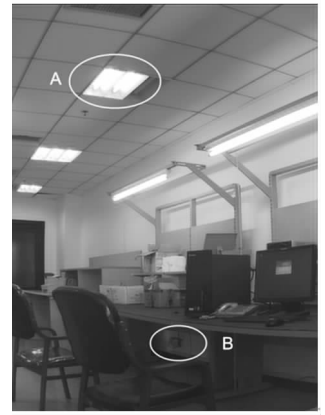
Fig. 4 Histogram of the image. (a) Histogram of the original image; (b) Histogram after equalized.



(a)适度曝光图像,曝光时间为 3007



(b)对图像(a)进行直方图均衡化处理后的图像



(c)利用 Meyer 小波函数对两幅曝光时间不同的图像进行融合后得到的图像

图 5 适度曝光图像与处理后的图像

Fig. 5 Moderate exposure image and images after processed

5 中 A 区),可见,利用单幅图像进行动态范围扩展,效果有限,且不能复原出已丢失的细节。

基于单幅图像动态范围扩展的局限性,本文采用的是多曝光法,利用两幅曝光时间不同的源图像进行融合处理,因短曝光图像能保留高亮度区域细节信息,长曝光图像能保留低亮度区域细节信息,对两幅图片进行融合以后就能获得更多的细节信息。如图 5 所示,与适度曝光图像(a)相

比,(c)图中的高亮度区域 A 区的灯管轮廓清晰可见,而低亮度区域 B 区的细节信息也得到了体现,动态范围显著扩展。

4 结 论

利用多曝光技术,分别获取两幅曝光过度和曝光不足的图像,对两幅图像运用小波变换进行分解,得到不同频率域的图像。在高频部分采用

局部方差最大准则进行融合,充分保留了图像的边缘信息,在低频部分运用基于人眼视觉模型进行融合,保持了观察者对显示图像与真实场景的亮度在主观感觉上的一致性。在实验一中,分别采用了 3 种不同的小波函数对图像进行分解与重构,由实验结果可看出,Haar 小波因为阶跃特性,无法完全重构原图像,融合后的图像在边缘部分会出现明显的锯齿波,影响图像的成像效果;db6 小波具有连续性和紧支撑结构,因此融合后的图像要优于采用 Haar 小波处理后的图像,但因为 db6 小波是非对称的,不能实现精确重构,融合后

的图像边缘会出现杂纹;而 Meyer 小波具有对称性和非常好的规则性,能精确重构图像,获得的图像边缘清晰,图像效果良好。在实验二中对适度曝光图像进行直方图均衡化处理,得到的图像平均亮度和对比显著增强,较暗区域的细节信息得到了体现,但对于曝光过度的灯管,处理后的图像仍然无法分辨出轮廓,动态范围提高能力不足;而多曝光法采用不同曝光度的源图像,包含了高亮度区域和低亮度区域的细节信息,融合后的图像能较真实地反映真实场景的亮度信息,动态范围得到了显著的扩展。

参 考 文 献:

- [1] Wyckoff C W. An experimental extended exposure response film [C]// *SPIE Newsletter*, Boston:SPIE, 1962:16-20.
- [2] Mann S. Compositing multiple pictures of the same scene [C]//*Proc. 46th Annual IS&T Conf.*, Cambridge: The Society of Imaging Science and Tehnology, 1993:50-52.
- [3] Yamada K, Nakano T, Yamamoto S, *et al.* Wide dynamic range vision sensor for vehicles [C]//*IEEE Intl. Conf. on Vehicle Navigation Info. Syst.*, Yokohama, Japan:IEEE,1994:405-408.
- [4] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition;the wavelet representation [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and machine Intelligence*,1989,11(7):674-693.
- [5] 李汉志,赵宝升,李伟. 基于多分辨率融合的 X 射线图像动态范围扩展技术 [J]. *无损检测*,2010,32(12):918-920,925.
- [6] 刘恒殊,黄廉卿. 基于人眼视觉特性的医学图像处理方法 [J]. *光电工程*,2001,28(4):38-41.
- [7] 何烽,徐之海,冯华君,等. 一种基于数字图像合成的扩展动态范围方法 [J]. *光电工程*,2003,30(5):66-68.
- [8] 黄梅,吴志勇,梁敏华,等. 暗背景下低灰度图像的实时增强 [J]. *液晶与显示*,2011,26(3):374-378.