

## 一种空域和变换域相结合的图像增强算法

张令波<sup>1</sup>, 葛秘蕾<sup>2</sup>

(1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 针对传统图像增强算法只使用空域或变换域处理策略的不足, 提出一种空域和变换域相结合的处理方法。首先通过使用高斯/拉普拉斯金字塔分解技术将原始灰度图像细分成不同频带, 然后在各个频带上分别使用伽玛校正实现对比度均衡化, 最后将均衡化结果再利用高斯/拉普拉斯金字塔重构技术进行恢复, 即可达到图像增强的目的。实验结果表明, 与传统图像增强算法相比, 该算法不但能够提高欠曝光区域的对比度, 而且能够对过曝光区域实现有效抑制, 达到很好的视觉均衡。

**关键词:** 图像增强; 高斯/拉普拉斯金字塔变换; 伽玛校正; 对比度均衡; 数字全变分

**中图分类号:** V271.4; TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)12-0045-04

## An Image Enhancement Algorithm Based on Space Domain and Transform Domain

ZHANG Ling-bo<sup>1</sup>, GE Mi-lei<sup>2</sup>

(1. Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Considering the shortage of the traditional image enhancement algorithms that it can only use space-domain or transform-domain processing strategy separately, a novel processing method combining space domain with transform domain was proposed. Firstly, the original gray images were decomposed into different frequency bands by using Gaussian/Laplacian pyramid transform. Secondly, gamma correction was employed to achieve contrast equalization in each band. Finally, the enhanced images were reconstructed from the equalized one by means of inverse pyramid transform. Experimental results indicated that: Compared with traditional image enhancement algorithms, the proposed one can not only increase the contrast of underexposure regions, but also effectively suppress the luminance of overexposure regions, and achieve a good visual balance.

**Key words:** image enhancement; Gaussian/Laplacian pyramid transform; gamma correction; contrast equalization; digital total variation

### 0 引言

图像增强技术现已广泛应用于军事和民用领域, 其原因在于无论是可见光还是红外成像, 由于受到光照、环境温度、光电转化效能等影响, 常出现图像亮度不均衡的情况, 具体表现在部分区域由于过曝光导致整体亮度很高, 而部分区域由于欠曝光整体亮度很低。为了改善这类图像的质量, 提高对比度, 图像增强技术应运而生。

一般来说, 图像增强技术<sup>[1]</sup>主要可以分为两大类: 基于空域的图像增强和基于变换域的图像增强。空域图像增强通过改变输入图像的像素值, 进而改善图像灰度的分布情况, 拉伸灰度值低区域的动态范围, 抑制灰度值高区域的动态范围, 维持图像的整体视觉均衡。该类技术的典型方法有: 分段线性拉伸法<sup>[2]</sup>、直方图均衡化法<sup>[3]</sup>、伽玛校正法<sup>[4]</sup>等, 其中, 改进的伽玛校正公式已作为 ITU-709 HDTV 的产品标准使用<sup>[5]</sup>。这类方法针对整幅图像进行处理, 即能够提高图像整体对比度, 但对过曝光区域的抑制能力不足, 不能够很好地解决局部区域对比度低的问题。变换域图像增强主要将图像映射到变换域空间, 然后利用图像细节的高频或

收稿日期: 2014-06-06

修回日期: 2014-06-14

作者简介: 张令波(1971—), 男, 广西荔浦人, 博士, 研究方向为图像处理、神经网络与智能控制。

低尺度特性在变换域进行处理,最后再逆映射回空域,间接达到图像增强的目的。其典型方法有:高斯/拉普拉斯金字塔变换<sup>[6]</sup>、脊波变换<sup>[7]</sup>、小波变换<sup>[8]</sup>等。该类技术的优点在于针对性强,能够很好地提升和加强图像细节(如边缘等),图像信息量较大,但由于只针对部分频段进行处理,因此增强后结果略显突兀,缺乏平顺性,视觉效果不太理想。

本文基于以上两类方法提出了一种将二者相结合的思路,首先通过使用高斯/拉普拉斯金字塔分解技术将原始灰度图像细分成不同频带,然后在各个频带上分别使用伽玛校正实现对比度均衡化,最后将均衡化结果再利用高斯/拉普拉斯金字塔重构技术进行恢复。这样,不但能够提高欠曝光区域的对比度,而且能够对过曝光区域实现有效抑制,达到很好的视觉均衡。

### 1 算法原理

本文算法在执行过程中主要分为三大步:高斯/拉普拉斯金字塔分解,金字塔系数调整和金字塔重构。

#### 1.1 高斯/拉普拉斯金字塔分解

在对原始图像  $I$  进行金字塔分解之前,首先将其灰度值归一化到  $[0,1]$  区间,归一化后的结果为

$$I' = I / (2^N - 1) \quad (1)$$

式中,  $N$  表示原始图像的位数。这样做的好处在于不需要再考虑不同灰度级图像对后续算法的影响。

高斯金字塔与拉普拉斯金字塔的关系如图1所示。

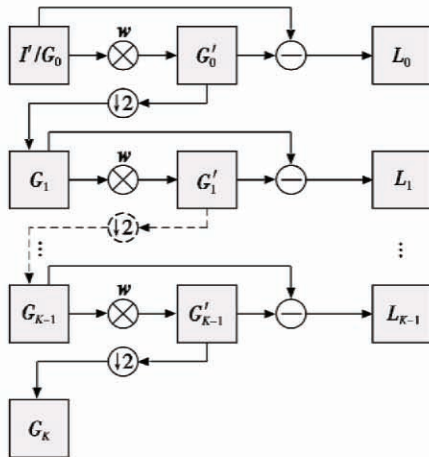


图1 高斯/拉普拉斯金字塔分解示意图

Fig.1 Block diagram of Gaussian/Laplacian pyramid decomposition

假设  $G_k (k=0, \dots, K)$  表示一个  $K+1$  层的高斯金字塔,  $L_k (k=0, \dots, K-1)$  表示对应的拉普拉斯金字塔。高斯金字塔通过循环迭代滤波和下采样过程实现

$$G_k = [w * G_{k-1}]_{\downarrow 2} \quad (2)$$

式中:  $G_0 = I'$ ; 符号  $*$  表示卷积运算; 符号  $\downarrow 2$  表示方括号里的图像使用步长 2 进行下采样;  $w$  是高斯滤波器系数。

$$w = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}。$$

拉普拉斯金字塔通过对应的高斯金字塔带通滤波得到

$$L_k = G_k - w * G_k \quad (3)$$

#### 1.2 高斯/拉普拉斯金字塔系数调整

伽玛校正是一种经典的图像增强方法,由于其算法简单、效果明显,现已广泛应用于各种电子显示设备中。但该方法不能控制图像增强的区域,即:对某些对比度低的区域增强的同时,会导致过曝光的加剧。为了弥补这个缺陷,将原始图像金字塔分解成若干频段,然后在每个频段上进行伽玛校正。不但可以提高各个频段低对比度区域的幅值,而且由于控制了频率范围,使过曝光区域得到了有效抑制。具体做法如下所述。

1) 使用伽玛校正分别对拉普拉斯金字塔的每一层做对比度均衡化处理。考虑到变换系数可能是负数,而伽玛校正不支持负数操作,因此先对负数取绝对值,增强后结果恢复原始符号

$$L'_k = (\text{abs}(L_k))^{\gamma_k} \times \text{sgn}(L_k) \quad (4)$$

式中:  $k=0, \dots, K-1$ ;  $\text{abs}(\cdot)$  表示取绝对值操作;  $\text{sgn}(\cdot)$  表示取符号操作;  $\gamma_k$  为校正系数,随着层数  $k$  的增加,校正系数随因子  $\lambda$  衰减。

$$\gamma_k = \lambda^k \gamma_0 \quad (5)$$

式中:  $\gamma_0 (0 < \gamma_0 \leq 1)$  是初始校正系数,它决定了拉普拉斯金字塔总体对比度均衡的强度;  $\lambda$  为一个常数,  $0 < \lambda \leq 1$ , 它的大小和层与层之间对比度差异化程度有关。这样做的好处在于消除重构图像的突兀感,使增强后的图像更具视觉效果。

2) 使用伽玛校正对高斯金字塔的第  $K$  层图像做对比度均衡化处理

$$G'_K = (\text{abs}(G_K))^{\gamma_K} \times \text{sgn}(G_K) \quad (6)$$

考虑到金字塔重构后的图像与原始图像相比在亮度上会有所差异(如变亮或变暗),而低频分量控制着图像的整体亮度。因此,将均衡化处理后的低通金字塔的第  $K$  层图像改造成亮度可调节的形式为

$$G''_K = \alpha(G'_K - \bar{G}'_K) + \beta \quad (7)$$

式中:  $\bar{G}'_K$  表示高斯图像  $G'_K$  的均值;  $\alpha$  和  $\beta$  分别为乘性和加性调节因子,这样,通过调节  $\alpha$  和  $\beta$  值可以改变重构后图像的整体亮度。

#### 1.3 高斯/拉普拉斯金字塔重构

首先从高斯金字塔最低分辨率的  $G'_K$  开始,通过拉普拉斯金字塔的每层迭代计算出较高分辨率的高斯图

像,最终恢复出原始图像。迭代过程为

$$G'_k = (1 + w) * L'_k + 4w * [G'_{k+1}]_{\uparrow 2} \quad (8)$$

式中: $k$ 由  $K-1$  递减至  $0$ ;符号  $\uparrow 2$  表示步长为 2 的上采样。

将重构出的图像  $G'_0$  做去归一化处理,即乘以原始图像的动态范围

$$I'' = bound(G'_0 \times (2^N - 1)) \quad (9)$$

式中: $I''$ 表示对比度均衡化后的图像; $bound(\ )$ 是一个截断函数,保证输出结果在范围  $[0, 2^N - 1]$  内。

### 1.4 算法流程

综合以上 3 节的讨论,本文算法的执行流程如图 2 所示,即

- 1) 将原始图像灰度值归一化到  $[0, 1]$  区间;
- 2) 对归一化后图像进行高斯/拉普拉斯金字塔分解;
- 3) 使用伽玛校正分别对拉普拉斯金字塔的每一层做对比度均衡化处理;
- 4) 使用伽玛校正对高斯金字塔的最顶层(分辨率最低层)图像做对比度均衡化处理;
- 5) 使用式(8)调节均衡化处理后高斯金字塔最顶层图像的亮度;
- 6) 使用高斯/拉普拉斯金字塔重构原始图像;
- 7) 将重构图像的灰度值去归一化并且限定到原始动态范围。

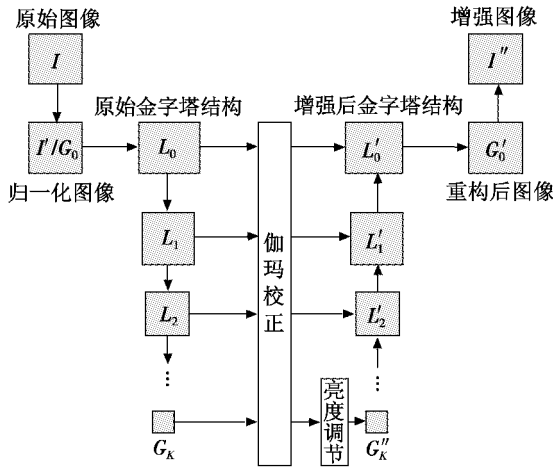


图 2 本算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

## 2 实验分析

本节使用两幅对比度不均衡的图像验证算法性能,其中一幅“Parisnight”如图 3a 所示,不仅有欠曝光区域(如远处的屋顶),而且还有过曝光区域(如街灯);另一幅“Flowers”如图 4a 所示,虽然没有过曝光区域,但背景的对比度均较低。算法执行参数分别为: $\gamma_0 = 0.8$ ,

$\lambda = 0.5, \alpha = 1, \beta = 0.5$ 。并且与典型空域增强算法(伽玛校正法)、变换域增强算法(小波变换法)相比较,最后借助图像数字全变分(Digital Total Variation, DTV)<sup>[9]</sup>给出定量评价结果。

假设图像大小为  $M \times N$ ,图像数字全变分的定义为

$$D_{DTV} = \frac{1}{M \times N} \sum_{a=(1,1)}^{(M,N)} \sqrt{\sum_{b \in \Omega_a} (u_a - u_b)^2} \quad (10)$$

式中: $u_a$ 和  $u_b$ 分别表示图像坐标为  $a$ 和  $b$ 的像素值; $\Omega_a$ 表示  $a$ 的八邻域; $D_{DTV}$ 表征了图像像素点与其周围像素的差异性,而这正是对比度的定义。因此, $D_{DTV}$ 能够很好地评价图像对比度的大小, $D_{DTV}$ 值越大,表明图像整体对比度越高,细节越丰富;反之亦然。

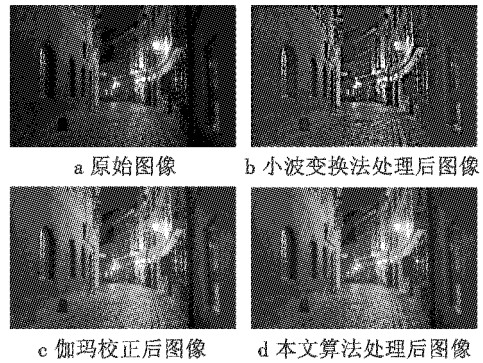


图 3 图像 Parisnight 的增强效果

Fig. 3 Enhancement effect of Parisnight image

图 3b 是经小波变换法处理后的结果,可以看出图像整体对比度很高,细节丰富,对过曝光区域也有一定抑制作用,但图像较突兀,视觉效果不是很理想;图 3c 是伽玛校正后的结果,整幅图像的对比度都得到了增强,视觉效果也较好,但过曝光区域明显变大(如街灯部分);本文算法的处理结果如图 3d 所示,它兼顾了伽玛校正法和小波变换法的优势,不但图像对比度得到了加强,而且过曝光区域也得到了有效抑制,整体视觉效果平顺自然,观赏性较优。

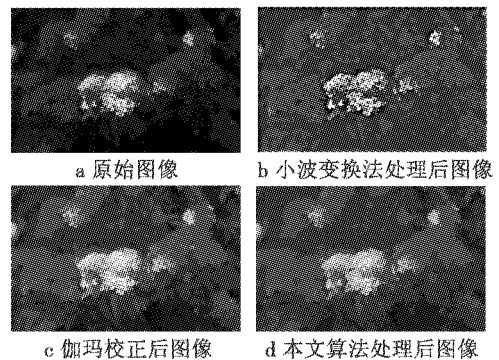


图 4 图像 Flowers 的增强效果

Fig. 4 Enhancement effect of Flowers image

图 4 显示了对自然风景的增强效果,与图 3 类似,经小波变换法处理后的图像虽然对比度高,细节丰富,

但视觉上并不自然,人工痕迹较明显。伽玛校正法和本文算法的处理效果相似,但本文算法在过亮区域的抑制能力更优。

表1使用数字全变分(DTV)定量评价各算法的处理结果。可以看出3种方法的处理结果与原图相比DTV数值都有不同程度的提高,这表明它们对原图都有增强效果。然而小波变换法的DTV最大,说明经它处理后的图像对比度最大,细节也最丰富,这与图3和图4的结论相一致,但该方法的视觉效果并不理想。伽玛校正法和本文算法的DTV较接近,它们的处理效果也相似,但本文算法的DTV偏高,说明本文算法在过曝光区域抑制、细节保持等方面均较优。

表1 各种算法处理结果的定量评价

Table 1 Quantitative evaluation to the processing results of each algorithm

	原图	小波变换法	伽玛校正法	本文算法
Parisnight	21.95	40.80	28.90	29.73
Flowers	9.29	19.14	12.03	12.84

图像对比度高并不能表明视觉效果就一定好,但对比度低则视觉效果一定不好。本文算法兼顾了这两方面优势,不但图像整体对比度大大提高,而且视觉效果也非常优秀,达到了图像增强的目的。

### 3 结论

本文提出了一种空域和变换域相结合的图像增强算法,它首先使用金字塔变换将图像细分成多个频段,然后在各个频段分别进行图像增强。这样,由于充分兼顾了两类增强算法的各自优势,因此不但可以提高欠曝光区域的对比度,而且对过曝光区域有一定抑制作用,具有较好的视觉效果<sup>[10]</sup>。仿真实验表明:本文算法与小波变换法相比,虽然DTV数值较低,但图像平滑自然,视觉效果较好;与伽玛校正法相比,本文算法在过曝光区域抑制、细节保持等方面均占优。

### 参考文献

[1] 于天河,郝富春,康为民,等. 红外图像增强技术综述[J]. 红外与激光工程,2007,36(s1):335-338.  
 YU T H, HAO F C, KANG W M, et al. Summarization on the infrared image enhancement technology[J]. Infrared

and Laser Engineering, 2007, 36(s1):335-338.  
 [2] 克兢,侯榆青,王大凯,等. 一种改进型保持形状的图像对比度增强算法[J]. 光子学报,2009,38(1):214-219.  
 KE J, HOU Y Q, WANG D K, et al. An improved algorithm for shape preserving contrast enhancement [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1):214-219.  
 [3] 刘松涛,吴钢. 基于广义直方图均衡的图像增强新方法[J]. 电光与控制,2010,17(3):12-15.  
 LIU S T, WU G. A novel method for image enhancement based on generalized histogram [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(3):12-15.  
 [4] RAFAEL C G, RICHARD E W. Digital image processing [M]. 2nd ed. New Jersey:Pearson, 2008.  
 [5] ZHANG C, BURT P J, GOOITZEN S W. Multi-scale multi-camera adaptive fusion with contrast normalization; US, 20090169102A1[P]. 2009-07-02.  
 [6] 杨凯峰,金海燕,石美红. 基于LP融合和亮度变换的图像增强[J]. 计算机工程,2009,35(15):220-223.  
 YANG K F, JIN H Y, SHI M H. Image enhancement based on Laplacian pyramid fusion and brightness transform [J]. Computer Engineering, 2009, 35(15):220-223.  
 [7] 王刚,肖亮,贺安之. 脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. 光学学报,2007,27(7):1183-1190.  
 WANG G, XIAO L, HE A Z. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7):1183-1190.  
 [8] 李晓漫,雷英杰. 小波变换和粗糙集的图像增强方法[J]. 电光与控制,2007,14(6):29-32.  
 LI X M, LEI Y J. An image enhancing method based on wavelet transform and rough sets [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(6):29-32.  
 [9] CHAN T F, OSHER S, SHEN J. The digital TV filter and nonlinear denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2):231-241.  
 [10] 甘新胜. 一种基于改进 Hausdorff 距离的图像匹配方法[J]. 指挥控制与仿,2012,34(4):117-118.  
 GAN X S. An image matching algorithm based on Hausdorff distance[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(4):117-118.

(上接第14页)

[7] TU Z, CHEN X, YUILLE A L, et al. Image parsing: Unifying segmentation, detection and recognition [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 63(2):113-140.

[8] LAZEBNIK S, SCHMID C, PONCE J. Beyond bags of features: Spatial pyramid matching for recognizing natural scene categories[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, NY, USA, 2006:2169-2178.