

PSLIP 新模型及在边缘检测和图像增强中的应用

张广燕, 王俊平, 邢润森, 白建民, 许 丹, 曹洪花

(西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 对数图像处理模型已形成并应用于图像处理的各个方面. 本文提出一种参数对称的对数图像处理(PSLIP)新模型. 该模型建立了一种可以处理图像负值部分带参数的对称结构. 同时该模型不仅能够对图像中感兴趣的部分进行自适应调整, 而且能够处理反射光图像和透射光图像. 为了验证 PSLIP 模型的有效性, 将其应用于边缘检测和图像增强中, 形成 PSLIP 边缘检测和 PSLIP 图像增强算法. 实验结果表明, 其效果均优于现有对数图像处理模型.

关键词: 对数图像处理; 参数对称的对数图像处理; 边缘检测; 图像增强

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)02-0377-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.02.026

A New PSLIP Model and Its Application in Edge Detection and Image Enhancement

ZHANG Guang-yan, WANG Jun-ping, XING Run-sen, BAI Jian-min, XU Dan, CAO Hong-hua

(School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The logarithmic image processing model is becoming increasingly important and being widely used in image processing field. This paper presents a novel parameterized symmetric logarithmic image processing (PSLIP) model which establishes a parameterized symmetric structure processing negative parts of the image. The proposed model not only adaptively adjusts the interesting parts of the image but also simultaneously processes the reflected light image and the transmitted light image. In order to verify the validity of PSLIP model, it is applied to edge detection and image enhancement, and forms PSLIP-Laplacian edge detection and PSLIP-image enhancement algorithm. The experimental results show that it outperforms available logarithmic image processing model in both respects.

Key words: logarithmic image processing; parameterized symmetric logarithmic image processing (PSLIP); edge detection; image enhancement

1 引言

图像处理可用数学变换方法改变一幅图像的某些特性^[1], 其应用包括图像增强、边缘检测和噪声抑制等. 然而, 由于数学变换中的线性图像变换存在一些明显的缺陷, 例如经过线性算术运算后图像的灰度值总是超出 $[0, M]$ 范围, 这就导致了图像信息的严重丢失, 进而无法获得令人视觉愉悦的图像.

为了解决图像处理中普遍存在的以上问题. 1988年, Jourlin 和 Pinoli 提出一种对数图像处理(LIP, Logarithmic Image Processing)模型^[2], 该模型主要用于处理有界强度值的透射光图像且与非线性人类视觉系统处理过程相一致. 1992年, G. Deng 等将 LIP 模型应用于 Lee^[3]提出的图像增强算法中^[4], 获得较好的效果. 进一步地, G. Deng 等基于巨型视觉传感器(GVS, GigaVision

Sensor)提出一般对数图像处理(GLIP)模型^[5], 以便使其更广泛地应用于图像处理领域. 2007年, Karen Panetta 等人提出参数对数图像处理(PLIP, Parameterized LIP)模型^[6], 该模型不仅可用于自适应调整图像的感兴趣区域, 而且可用在图像增强、边缘检测和图像融合等方面^[7-9]. 为了能够更好地处理图像的细节部分, Vorobel R 等人也提出 LIP 模型参数化的思想^[10]. 然而, 上述模型不能有效处理图像的负值部分, 而在实际应用中超声波医学图像等都包含负值. 为了处理包含负值的图像, Patrascu 等人提出了一种定义在 $(-1, 1)$ 范围内的同质对数图像处理(HLIP, Homomorphic LIP)模型^[11]. 基于 Vertan 等人提出了定义在 $(-1, 1)$ 范围内的伪对数图像处理模型^[12], Florea 等人提出了动态范围增强的线性分段对数图像处理模型^[13]. 由于以上模型仅在数学上满足对称范围 $(-1, 1)$ 的定义, 并没有和人类视觉系统的

处理过程相联系,因此无法获得令人视觉愉悦的处理图像.2012年 Laurent Navarro 等人提出了对称对数图像处理(SLIP, Symmetric LIP)模型^[14],该模型能够同时处理透射光图像和反射光图像,并且其处理效果和人类视觉系统相一致.此外,由于 SLIP 模型的所有向量运算都是定义在 $(-M, M)$ 对称范围内,从而解决了 LIP 模型不能处理图像负值部分的问题.目前 SLIP 模型已成功应用于拉普拉斯边缘检测^[14]和图像增强中.

针对人类视觉系统具有很大的变化性以及图像处理需求的不同,本文提出一种参数对称的对数图像处理(PSLIP)模型.该模型建立了一种可以处理图像负值部分带参数的对称结构.同时该模型很好地综合了 PLIP 模型对图像中感兴趣的部分进行自适应调整的特性和 SLIP 模型可以同时处理反射光图像和透射光图像的特性.为了验证 PSLIP 模型的有效性,将该模型应用于边缘检测和图像增强中,形成 PSLIP 边缘检测和 PSLIP 图像增强算法.实验结果表明,其边缘检测和图像增强的效果均优于现有的对数图像处理模型.

2 PSLIP 新模型

下面先给出构成 PSLIP 新模型的基本同态函数和向量运算,然后讨论其特性.

2.1 PSLIP 模型基本同态函数

$$\varphi(F) = -\lambda(M) \operatorname{sgn}(F) \ln \left[1 - \frac{|F|}{\lambda(M)} \right] \quad (1)$$

$$\varphi^{-1}(F) = -\lambda(M) \operatorname{sgn}(F) \left[1 - e^{-\frac{|F|}{\lambda(M)}} \right] \quad (2)$$

其中,灰度值 F 定义在 $(-M, M)$ 对称范围内, $\operatorname{sgn}(F)$ 表示符号函数, $\lambda(M)$ 等于 $AM + B$, A 和 B 为常数.式(1)是 PSLIP 模型基本同态函数关于灰度值的正变换,式(2)是其逆变换.

图 1(a)和(b)分别是 PSLIP 模型基本同态函数的正变换和逆变换.图 1(a)是式(1)的函数图形,容易看出 PSLIP 模型基本同态函数的正变换是关于原点奇对称的,因此该模型能够同时处理 $(-M, M)$ 范围内的透射光图像和反射光图像.图 1(b)是式(2)的函数图形,也是图 1(a)的反变换.图 1(b)表明当 $\lambda(M) = M$ 时, $\varphi^{-1}(F)$ 的值域范围是 $(-255, 255)$,即通过反变换的灰度值范围和式(1)的定义域一致.

图 2 比较了 LIP、SLIP 和 PSLIP 模型基本同态函数正变换的函数图形,其中 $M = 256$, $\lambda(M)$ 是根据 PLIP 模型中选取的参数.首先,从图 2(a)可以看出,SLIP 模型是 PSLIP 模型的一种特例,因为当 $\lambda(M) = M$ 时,SLIP 模型基本同态函数的正变换和 PSLIP 模型函数图形重合.其次,从图 2(b)能够看出,相比 SLIP 模型,PSLIP 模型基本同态函数将灰度值拉开的范围更小.当 $\lambda(M)$ 越大,PSLIP 基本同态函数越趋于水平直线,即对图像

灰度值的改变越不明显.同时其也克服了 LIP 模型扭曲图像负值信息的缺点,具有能够同时处理 $(-M, M)$ 范围内的透射光图像和反射光图像的特点.

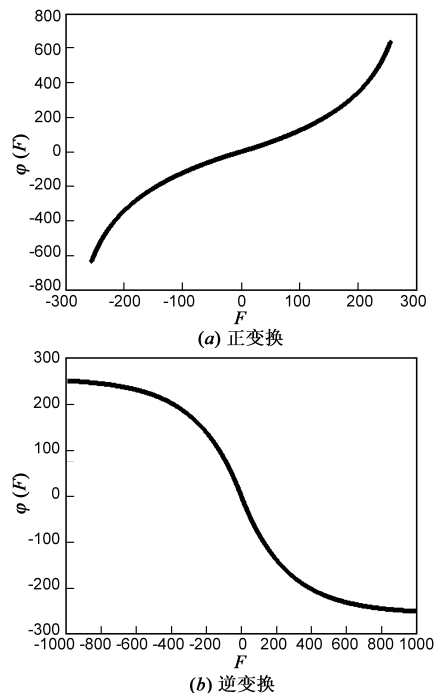


图1 PSLIP模型基本同态函数正变换和逆变换

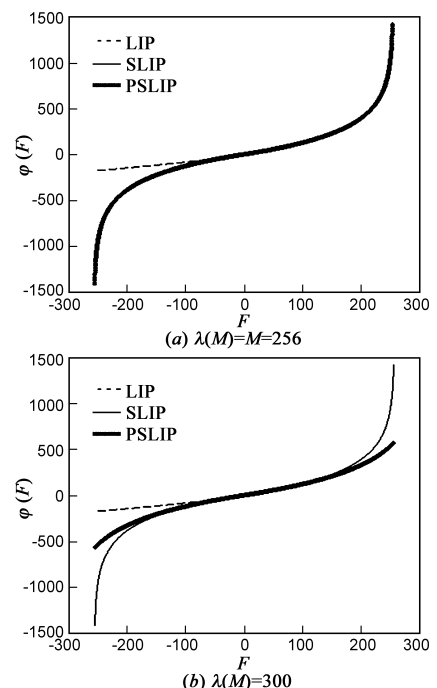


图2 LIP、SLIP和PSLIP基本同态函数正变换函数图形比较

2.2 PSLIP 模型向量运算

接下来,我们给出 PSLIP 模型向量运算.加法 灰度值 F 和 G 的对数加定义为:

$$F \oplus G = r(M) \operatorname{sgn}(F + G) \left[1 - \left(1 - \frac{|F|}{r(M)} \right)^{r_1} \left(1 - \frac{|G|}{r(M)} \right)^{r_2} \right] \quad (3)$$

$$\text{其中, } r_1 = \frac{\operatorname{sgn}(F)}{\operatorname{sgn}(F + G)}, r_2 = \frac{\operatorname{sgn}(G)}{\operatorname{sgn}(F + G)}.$$

数乘 灰度值 F 和标量 λ 的数乘定义为:

$$\lambda \otimes F = x(M) \operatorname{sgn}(\lambda F) \left[1 - \left(1 - \frac{|F|}{x(M)} \right)^{|\lambda|} \right] \quad (4)$$

减法 灰度值 F 和 G 的对数减定义为:

$$F \ominus G = k(M) \operatorname{sgn}(F - G) \frac{|F| - |G|}{k(M) - |G| + \epsilon} \quad (5)$$

其中, F 和 G 是 $(-M, M)$ 范围内的图像灰度值, $r(M)$, $k(M)$ 和 $x(M)$ 等于 $AM + B$, ϵ 是防止分母为 0 的小常数. \oplus 是 PSLIP 加法, \otimes 是 PSLIP 数乘, \ominus 是 PSLIP 减法.

2.3 PSLIP 模型的特性

通过对 PSLIP 模型基本同态函数和向量运算的分析, 可以总结出 PSLIP 模型的特性:

(1) PSLIP 模型向量运算更具有一般性.

当 $\gamma(M) = x(M) = k(M) = M$ 时, PSLIP 模型向量运算转化为 SLIP 模型. 因此, SLIP 模型是 PSLIP 模型的一种特例.

(2) PSLIP 模型向量运算能代替线性算术运算. 当参数 $\lambda(M)$, $r(M)$, $x(M)$ 趋于无穷大时, PSLIP 模型向量运算转化为一般线性运算.

(3) 当参数 $\lambda(M)$, $r(M)$, $x(M)$ 在 $[M, \infty)$ 范围内取值时, PSLIP 模型向量运算能够生成介于 SLIP 模型向量运算和一般线性算术运算两种极限情况的更多种可能情况.

(4) PSLIP 模型向量运算满足图像处理框架的几个基本要求^[15-17]:

(a) 该模型是在相关图像形成的理论上提出的.

(b) 该模型的运算和图像物理特性一致.

(c) 该模型的运算在计算上是有效的.

(d) 该模型有实际的应用价值.

(e) 该模型使图像信息丢失最小化.

这五个基本要求说明了该模型没有破坏图像的任何信息.

综上, PSLIP 模型延伸了 SLIP 模型的概念. 对于应用中更具体和复杂的需求来说, 更多的参数将提供给 PSLIP 新模型更灵活的特性. 因此, 运用 PSLIP 模型将 SLIP 模型参数化是一个很好的自适应处理图像的方法.

3 PSLIP 用于边缘检测

为了验证 PSLIP 模型的有效性, 将其应用于边缘检测中, 形成 PSLIP 边缘检测算法.

3.1 PSLIP 拉普拉斯运算

Deng 和 Pinoli 已经提出了 LIP 拉普拉斯运算^[18]. LIP 拉普拉斯算子是关于图像灰度色调函数的, 因此被统称为类拉普拉斯算子. 本文运用的 PSLIP 拉普拉斯算子是图像处理中的标准拉普拉斯算子, 这是因为 PSLIP 模型基本同态函数和向量运算都是由图像灰度值定义的. 基于此, PSLIP 拉普拉斯滤波可用下式计算:

$$L(i, j) = \varphi^{-1}(\varphi(F(i, j)) * k) = F(i, j) \boxtimes k \quad (6)$$

其中, \boxtimes 是 PSLIP 卷积运算, $F(i, j)$ 是原图像的灰度值, k 是拉普拉斯核算子.

3.2 PSLIP 拉普拉斯边缘检测的实验结果评价与分析

下面以 Lena 图像 (512×512) 为例, 给出 LIP、PLIP、SLIP 和 PSLIP 模型拉普拉斯边缘检测的实验结果, 如图 3 所示.

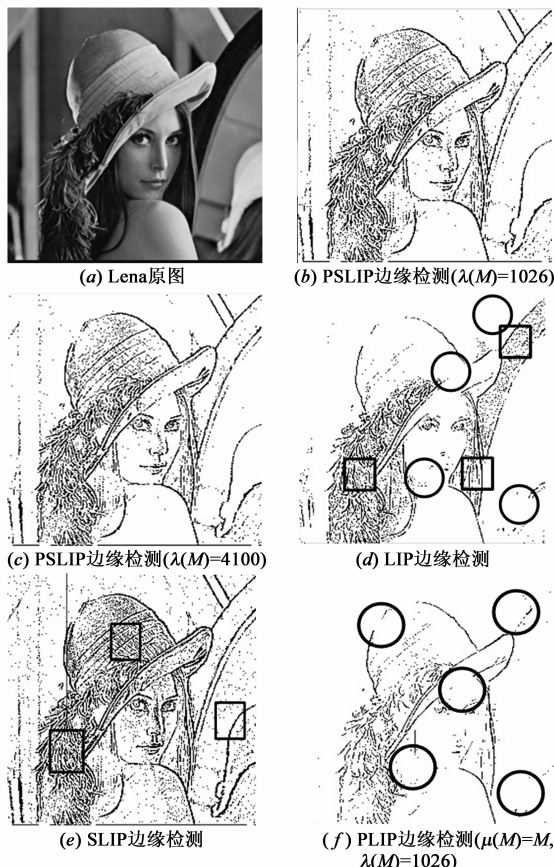


图3 Lena图像LIP、SLIP、PLIP和PSLIP模型的不同阈值的拉普拉斯边缘检测结果

同时我们也在下表 1 中给出 Lena 图像 LIP、SLIP、PLIP 和 PSLIP 边缘检测的阈值.

由 Lena 图像图 3(a) 边缘检测结果可以看出, 图 3(b) 和图 3(c) 均取得较好的边缘检测效果, 既抑制了噪声, 又检测到所有的边缘. 很明显, 图 3(d) 中有的部位 (用矩形标注) 噪声严重, 有的部位 (用圆形标注) 信息

丢失严重;图 3(e)虽然能够检测到每个边缘,但是有的部位(用矩形标注)噪声严重;同样,而图 3(f)中用圆形标注的丢失很多边缘信息,没有很好地检测到图像的边缘。

表 1 不同拉普拉斯边缘检测的阈值

模型 阈值 图像	PSLIP	LIP	SLIP	PLIP
Lena	0.2000	0.2008	0.1995	0.1002

综上所述,PSLIP 拉普拉斯边缘检测不仅能检测到图像的所有边缘,而且能抑制噪声,取得了令人视觉愉悦的边缘检测效果。

3.3 不同边缘检测算法的时间消耗

为了说明 PSLIP 拉普拉斯边缘检测算法的性能,我们对 Lena 图(512 × 512)、芯片图(512 × 512)和版图(329 × 468)图像进行以上算法时间消耗的分析.采用硬件环境 Core2 E5800 双核处理器,主频 3.2GHz、内存 2G 的 PC 机,软件环境 MATLABR2010 编程实现以上算法,并统计其时间消耗如表 2 所示。

表 2 不同算法时间消耗的结果 (单位:秒)

时间 / s 模型 图像	Lena	芯片图	版图
PSLIP($\lambda(M) = 1026$)	1.5487	9.8756	5.6210
PSLIP($\lambda(M) = 4100$)	1.5496	9.6521	5.5820
LIP	1.5325	9.5620	5.2188
SLIP	1.5063	9.6120	5.3100
PLIP	1.5406	9.5436	5.3000

通过表 2 可以看出以上算法有相似的时间消耗,PSLIP 模型在没有消耗更多时间的情况下提高了边缘检测的性能,降低了噪声的影响。

4 PSLIP 在图像增强中的应用

图像增强的目的是为了改善图像的质量或加强图像的某些特性,导致结果图像相对于原始图像更适合人或机器分析处理.同样这部分为了再次证明 PSLIP 模型的有效性,我们将该模型应用于图像增强中。

4.1 PSLIP 图像增强算法

基于 Lee^[3]提出的图像增强算法,使用 PSLIP 模型能够实现图像的增强.同样,我们基于 PSLIP 模型进行图像增强时,可以对图像以不同模式进行增强:以反射光图像的模式和以透射光图像的模式.以反射光图像的模式进行增强图像时,可直接利用图像灰度值进行增强;以透射光图像的模式进行增强时,需要如下式(7)

的变换:

$$F = \tilde{F} - \mu(M) \quad (7)$$

即将透射光图像 \tilde{F} 转换为一个负值的光强滤波器 F ^[14],然后进行 PSLIP 图像增强。

为了客观说明以上增强算法的优越性,有必要建立一种图像质量的客观评价标准^[19].本文中我们选用熵增强方法 EMEE 评价 PSLIP 图像增强的效果.该方法已在现有的 LIP、PLIP 和 SLIP 图像增强算法的客观评价中应用,同时相比其他客观评价 AWC^[20]和 logAME^[21]等,其更符合人类主观视觉的效果。

下面描述 EMEE 的评价标准,如式(8).其是通过把一幅图像分成大小为 $k_1 \times k_2$ 的区域,然后用式(8)处理每个块,并平均其结果^[22].

$$EMEE = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} \frac{I_{\max}^{\omega; k, l}}{I_{\min}^{\omega; k, l} + c} \log \frac{I_{\max}^{\omega; k, l}}{I_{\min}^{\omega; k, l} + c} \quad (8)$$

其中, $I_{\max}^{\omega; k, l}$ 和 $I_{\min}^{\omega; k, l}$ 分别是大小为 $k_1 \times k_2$ 区域块的最大和最小灰度值, c 是不为零的小常数。

4.2 PSLIP 图像增强的实验结果评价与分析

为了验证本文增强算法的性能,我们基于相同的平台编程实现相关算法,并通过大量图像进行实验测试。

实验中,我们随机选取版图(329 × 468)图像进行 LIP、PLIP、PSLIP 增强算法和直方图均衡化的对比分析.如下图所示,图 4(a)为原始图像,经过 LIP 图像增强的结果图像为图 4(b);经过 PLIP 图像增强的结果图像为图 4(c);运用 PSLIP 增强算法同样可获得两幅图像,即图 4(a)以反射光图像的模式增强的效果为图 4(d);以透射光图像的模式增强的效果为图 4(e);同时,直方图均衡化的结果是图 4(f).根据经验,这里我们取 n 为 3, $k_1 = 16$, $k_2 = 16$, $\lambda(M) = 1026$, $\mu(M) = M = 256$ 。

通过以上 LIP、PLIP、PSLIP 增强算法和直方图均衡化的图像增强效果可以看出:

(1)以反射光图像的模式对图像进行增强,PSLIP 增强算法能够增强图像的细节和提升图像的整体对比度,获得的结果图像更能使人视觉愉悦,同时客观评价标准 EMEE 也说明了该模式对图像增强的优越性.对于图 4(a)来说,用 PLIP 增强算法获得的结果图 4(c)与 LIP 增强算法的结果图 4(b)相比,缺陷和线网边缘等细节信息都比较清晰.而用本文算法增强的结果图 4(d)与 PLIP 增强算法获得的结果图 4(c)相比,缺陷和线网边缘等更加清晰,更能使人视觉愉悦,同时也为版图图像做后期处理打下基础。

(2)以透射光图像的模式对图像进行增强,运用本文增强算法获得的结果图像效果还是较好,同样客观评价标准 EMEE 也说明了这一点.对于图 4(a)来说,用

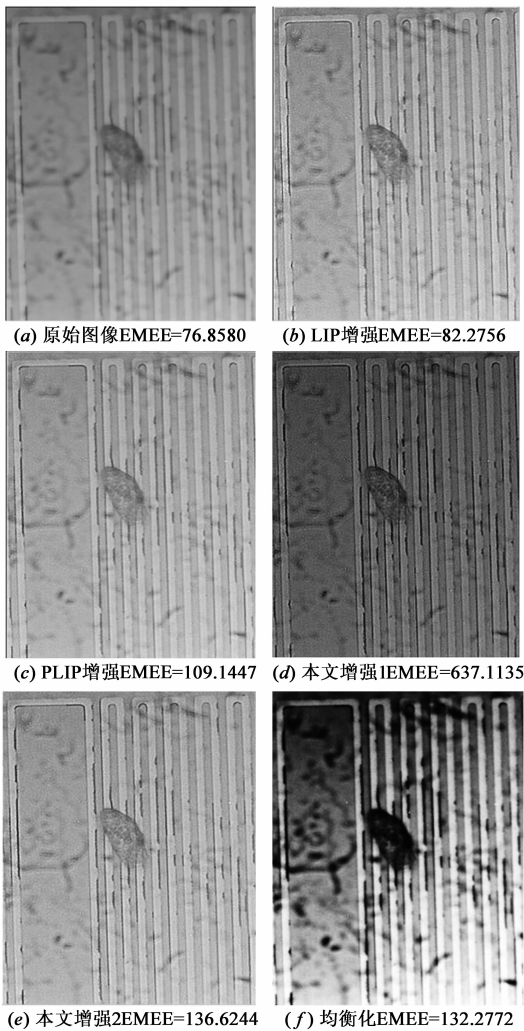


图4 版图图像不同增强算法的结果

本文算法增强的结果图 4(e)与 PLIP 增强算法的结果图 4(c)相比,版图图像的一些细节信息更加清晰,更便于版图优化中缺陷的提取。

(3)对于直方图均衡化的效果,图 4(f)的客观评价标准 EMEE 表明,其效果明显不如 PSLIP 算法的增强效果.直方图均衡化是通过增加图像灰度值的动态范围来提升图像对比度的,这样容易导致图像曝光,因此图像的灰度信息容易改变,也在某种程度上影响着图像的后续处理。

同时,我们再次选择 15 幅图像进行以上实验,能够得到相似结论.综上,说明了 PSLIP 增强算法可以以不同的模式对图像进行增强,通过调节相关参数来获得更能使人视觉愉悦的图像效果。

4.3 不同图像增强算法的时间消耗

同样,为了说明 PSLIP 图像增强算法的性能,我们在相同实验环境下,分析版图(329×468)、芯片图(512×512)和人物(256×256)图像 LIP、PLIP、PSLIP 模型增强算

法和直方图均衡化的时间消耗,结果如下表 3 所示。

表 3 不同算法的时间消耗 (单位:秒)

时间 / s 模型	图像	芯片图	版图	人物图
		PSLIP1	1.6781	1.2094
PSLIP2	1.8623	1.2531	1.0013	
LIP	2.2356	1.3750	1.0231	
PLIP	2.3908	1.4032	1.1351	
HLE	1.8894	1.3125	1.0625	

从表 3 可以看出,PSLIP 增强算法消耗更少的时间.因为 LIP 和 PLIP 增强算法是运用灰度色调函数来实现的,即灰度值 F 是经过式 $f = M - F$ 转变为灰度色调函数 f 来进行计算的.然而,PSLIP 模型增强算法是直接处理图像灰度值 F ,不需要灰度色调函数的转变.综上,说明了 PSLIP 增强算法不但节省了时间消耗,而且达到很好的效果。

5 结论及未来工作

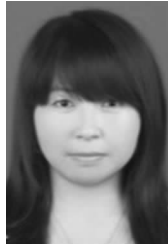
本文提出一种 PSLIP 新模型,该模型建立了一种能够处理图像负值部分带参数的对称结构.通过讨论其特性,提出的模型不仅能够自适应地调整图像中感兴趣的部分,而且能够同时处理反射光图像和透射光图像.为了说明 PSLIP 模型的有效性,将其应用于边缘检测和图像增强中,形成 PSLIP 边缘检测和 PSLIP 图像增强算法.实验结果表明,其效果均优于现有的对数图像处理模型.此外,PSLIP 模型在图像恢复和数学形态学等方面的应用是后续研究的内容。

参考文献

- [1] 李哲涛,李仁发,谢井雄.基于全向小波的图像边缘检测算法[J].电子学报,2012,40(12):2451-2455.
Li Zhe-tao, Li Ren-fa, Xie Jing-xiong. An edge detection algorithm based on omni-directional wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12): 2451-2455. (in Chinese)
- [2] Jourlin M, Pinoli J. A model for logarithmic image processing [J]. Journal of Microscopy, 1988, 149(1): 21-35.
- [3] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. IEEE Trans Pattern Anal, 1980, 2: 165-168.
- [4] Deng G. An entropy interpretation of the logarithmic image processing model with application to contrast enhancement [J]. IEEE Trans Image Process, 2009, 18(5): 1135-1140.
- [5] Deng G. A generalized logarithmic image processing model based on the giga-vision sensor model [J]. IEEE Trans Image

- Process, 2012, 21(3): 1406 – 1414.
- [6] Panetta K, Wharton E, Aгаian S. Parameterization of Logarithmic Image Processing Models[EB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.152.4779&rep=rep1&type=pdf>. 2013-04-20.
- [7] Panetta K A, Aгаian S S, Zhou Y, Wharton E J. Parameterized logarithmic framework for image enhancement[J]. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2011, 41(2): 460 – 473.
- [8] Wharton E J, Panetta K, Aгаian S S. Logarithmic edge detection with applications[A]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC '07)[C]. Montreal: IEEE, 2007. 3346 – 3351.
- [9] Nercessian S, Panetta K, Aгаian S. Multiresolution decomposition schemes using the parameterized logarithmic image processing model with application to image fusion[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, 2011: 515084.
- [10] Vorobel R, Botsian V. Parameterization method for logarithmic image processing model[A]. 2012 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET)[C]. Ukraine: TCSET, 2012. 408 – 408.
- [11] Patrascu V. Rough sets on four-valued fuzzy approximation space[A]. FUZZ-IEEE[C]. London: IEEE, 2007. 1 – 5.
- [12] Vertan C, Oprea A, Florea C, Florea L. A pseudo-logarithmic image processing framework for edge detection[A]. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems[C]. France: IEEE, 2008. 637 – 644.
- [13] Florea C, Vertan C. Piecewise linear approximation of logarithmic image processing models for dynamic range enhancement[J]. University Politehnica of Bucharest Scientia Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 2009, 71(2): 3 – 14.
- [14] Navarro L, Courbebaisse G. Symmetric Logarithmic Image Processing Model, Application to Laplacian Edge Detection [EB/OL]. <http://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/hal-00709350/>. 2012-06-10.
- [15] Pinoli J C. A general comparative study of the multiplicative homomorphic, log-ratio and logarithmic image processing approaches[J]. Signal Process, 1997, 58(1): 11 – 45.
- [16] Debayle J, Gavet Y, Pinoli J C. General adaptive neighborhood image restoration, enhancement and segmentation[A]. the 3rd International Conference on Image Analysis and Recognition [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 29 – 40.
- [17] Pinoli J C, Debayle J. Logarithmic adaptive neighborhood image processing (LANIP): Introduction, connections to human brightness perception, and application issues[J]. EURASIP J Appl Signal Process, 2007, 2007: 036105.
- [18] Deng G, Pinoli J. Differentiation-based edge detection using the logarithmic image processing model[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 1998, 8(2): 161 – 180.
- [19] Zhang Ming-Hui, Zhang Yao-yu. Cr image enhancement based on human visual characteristics[A]. 2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICDDA)[C]. Qinhuangdao: IEEE, 2010. 529 – 532.
- [20] Yu T, Li Q, Dai J. New enhancement of infrared image based on human visual system[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(1): 206 – 209.
- [21] Panetta K, Wharton E J, Aгаian S S. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure [J]. IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(1): 174 – 188.
- [22] Wharton E, Panetta K, Aгаian S. Human visual system based similarity metrics[A]. Proc. of IEEE International Conf on Systems, Man and Cybernetics [C]. Singapore: IEEE, 2008. 685 – 690.

作者简介



张广燕 女, 1987年8月出生于甘肃定西. 硕士研究生. 主要研究方向为图像/视频处理及应用.

E-mail: zh_gy_358@126.com



王俊平 女, 1964年出生于陕西渭南. 西安电子科技大学教授. 主要研究方向为多媒体通信、图像/视频处理及应用.