

文章编号 1004-924X(2006)01-0070-07

基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究

王彦臣¹, 李树杰², 黄廉卿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; 2. 东北师范大学 物理系, 吉林 长春 130021)

摘要:提出了基于多尺度 Retinex(MSR)方法的医学数字 X 光图像增强处理方法, 论述了该算法的原理及实现方法。在 3 种标准偏差下, 求得高斯滤波系数; 然后使用 3 种不同的高斯滤波系数对 X 光图像进行卷积操作, 将 3 种标准偏差尺度下得到的结果进行加权平均; 最后将输出灰度值进行增益映射, 得到可用于显示的结果。试验结果表明: MSR 算法既可实现低对比的数字 X 光图像增强, 又能实现图像的动态范围压缩, 可显著提高暗区数字 X 光图像的信息。将该方法与几种常用图像增强方法进行了分析比较, 表明 MSR 算法使得 X 光图像具有更好的灰度分布, 能够显著提高暗区图像的信息量, 其增强后的信息熵是常规增强方法的 2 倍, 表现出了优良的性能。该方法克服了目前常规的数字 X 光图像增强方法的不足, 能够满足医生临床诊断的要求。

关键词: Retinex; 图像对比度; 图像增强; 动态范围压缩

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Enhancement of radiography based multiscale Retinex

WANG Yan-chen¹, LI Shu-jie², HUANG Lian-qing¹

1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Department of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130021, China)*

Abstract: An enhancement algorithm of radiography based on multiscale Retinex was presented. The three different Gaussian filter coefficients under three different deviations were calculated, and the convolution operation was implemented between the image distribution and Gaussian filters, a weighted average of multiscale was gained and mapped to gray range of display device. With this method, image contrast enhancement, sharpening and dynamic range compression were achieved at the same time. The information of hidden area of digital radiograph was obviously enhanced. The enhancement technique was compared with other techniques such as histogram equalization, homomorphic filter. The results of experiment show that MSR can more observably improve entropy of digital X-rays than other techniques, and also show that the algorithm can overcome the lack of enhancement of traditional digital X-rays methods and satisfy the clinic demand.

Key words: Retinex; image contrast; image enhancement; dynamic range compression

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2005-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 69677015)。

1 引言

在医学数字 X 光图像处理中,对图像对比度较差、图像亮度很暗、动态范围又很宽的情况,需进行增强处理,以满足医生临床诊断的要求。因此,当前对 X 光医学影像图像增强的算法非常多,例如 gain/offset 修正、直方图均衡、同态滤波等等,但是这些方法都只是对一部分具有特殊性质的图像有较好的效果,例如,直方图均衡方法在原始图像的直方图是单峰的情况下,能够取得较好的增强效果,但是当图像的直方图是双峰时,增强的结果就无法令人满意;当图像中的亮度有较大差异时,同态滤波方法往往会产生较多的假象。现实中所获取的医学数字 X 光图像的亮度很低,使用常规的数字 X 光图像增强方法无法分辨图像中的较暗区域内的图像细节信息,同时,由于医学 X 光图像的动态范围比显示设备高出很多,所以需要一种有效图像增强算法,在能够提高图像中较暗区域的细节信息的同时,又能够压缩图像的动态范围以适应显示设备的要求。

为此,本文针对数字 X 光影像的特点及常规增强方法的不足,提出了基于多尺度 Retinex 算法对医学数字 X 光图像进行增强处理,以满足医生临床诊断的要求。

2 Retinex 算法理论

Land^[1]首先提出了 Retinex 作为人眼感知亮度和色度的视觉模型,该理论论述了人眼视觉系统是如何获取景物的图像,并具有色感一致性。所谓色感一致性,是指在人眼能够在不同亮度情况下仍可辨认物体本来颜色的能力。对于灰度图像而言,色感一致性体现了在不同亮度情况下分辨物体灰度级(亮度)的能力。Land 基于 Retinex 模型,定义理想的图像 $f(x,y)$ 为:

$$f(x,y) = r(x,y) \times i(x,y), \quad (1)$$

即一幅图像 $f(x,y)$ 可以用环境亮度函数 $i(x,y)$ 和景物反射函数 $r(x,y)$ 的乘积来表示。环境亮度函数 $i(x,y)$ 描述周围环境的亮度,与景物无关;而景物反射函数 $r(x,y)$ 是指景物反射能力,与照明无关,它包含了景物的细节信息。基于这种模型,得到的环境亮度函数 $i(x,y)$ 是一种变

化缓慢的图像的低频信息;而反射函数 $r(x,y)$ 则包含着图像中的大部分高频细节信息。Land 基于人眼视觉系统引入了图像的 center/surround 空间形式^[1],Jobson 等人^[6]在 Land 的研究成果基础上,定义了单尺度的 Retinex 算法(Single Scale Retinex, SSR),该算法可用下面的表达式描述:

$$R(x,y) = \log I(x,y) - \log [F(x,y) * I(x,y)] = \log \frac{I(x,y)}{F(x,y) * I(x,y)}, \quad (2)$$

$R(x,y)$ 是输出的图像函数, $I(x,y)$ 是输入图像的分布函数,* 代表卷积操作, \log 为自然对数, $F(x,y)$ 被称为环境函数。对于环境函数的选择可以有很多种,Land 等人选择了 $F(x,y) = 1/r^2$, Moore^[7] 提出了使用指数函数 $F(x,y) = \exp(-r/c)$, Hurlbert 等人提出了使用高斯函数作为环境函数:

$$F(x,y) = K \exp(-(x^2 + y^2)/\sigma^2), \quad (3)$$

其中, σ 为高斯函数的标准偏差,选择 K 使得下式成立

$$\iint F(x,y) dx dy = 1, \quad (4)$$

标准偏差 σ 的选择会直接影响图像增强的效果,它控制着图像中有多少细节信息被保留,当选取较小的标准偏差,能够完成动态范围的压缩;当选取较大的标准偏差时,色感一致性较好。通常都是在动态范围压缩和色感一致性之间寻找平衡点。实验表明, σ 取值在 50~100 个通常被看作是一种折衷的方案。但是由于该方法只是单尺度的,因此如果想在图像的动态范围压缩及图像的色感一致性要好这两方面都取得良好的效果,必须对单尺度进行改进,而采用多尺度 Retinex 算法。

3 多尺度 Retinex 算法

多尺度(MultiScale Retinex, MSR)算法是一种既可很好完成图像的动态范围压缩,又可保证图像的色感一致性好的图像增强方法。该算法可用下式描述:

$$R_i(x,y) = \sum_{k=1}^K W_k (\log I_i(x,y) - \log [F_k(x,y) * I_i(x,y)]) \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

其中下标 i 表示第 i 个光谱带, N 表示光谱带个

数, $N=1$ 时代表灰度图像, $N=3$ 代表彩色图像 (RGB)。 W_k 表示和 F_k 相关的权重系数, k 表示环境函数的个数, 其中环境函数 F_k 选取不同的标准偏差 σ_k , 用来控制环境函数范围的尺度。实验表明对于大多数图像而言, 选取大、中、小 3 个尺度 (选用 15、80 和 250), 并且每个尺度的权重可以相同, 也可以根据侧重动态范围压缩或是侧重色感一致性的需要来选取。

通常利用 MSR 方法处理后的图像像素值会出现负值, 而且会出现超出显示器的显示范围的情况, 这就需要将其平移和压缩到显示器显示的范围。这可利用 gain/offset 方法对图像像素进行修正 (如式 (6)), 再把修正后的图像的灰度值利用式 (7) 映射到显示器显示的灰度范围 (0~255)。

$$R_o(x, y) = G \times R_i(x, y) + \text{offset}, \quad (6)$$

$$R(x, y) = 255 \times \frac{R_o(x, y) - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}. \quad (7)$$

其中, $R_i(x, y)$ 和 $R_o(x, y)$ 分别为图像的输入及输出灰度值。对增益系数 G 和偏移量 offset 的选取做了大量的研究^[6], 结果表明由于利用 MSR 处理后各种图像具有非常类似的直方图分布, 因此对大多数图像这两个量可以取固定的值, 而不会影响图像的增强效果, 这里分别选取 $G=3$ 和 $\text{offset}=50$, r_{\max} 和 r_{\min} 分别为修正后图像的最大灰度值和最小灰度值, $R(x, y)$ 为映射后的用来显示的图像灰度值。

4 多尺度 Retinex(MSR) 算法在数字 X 光影像增强处理中的应用

在研制数字 X 光影像仪^[8]中, 我们利用多尺度 Retinex 算法模型来处理数字 X 光图像, 环境亮度函数 $i(x, y)$ 相当于穿过人体入射到成像板上的 X 光强度; 反射函数 $r(x, y)$ 表征人体各部位对入射 X 光吸收系数的变化。亮度函数 $i(x, y)$ 主要决定了 X 光图像的动态范围, 其变化极其缓慢。而反射函数 $r(x, y)$ 代表了人体各部位的细节, 主要决定了图像的局部对比度, 其变化非常迅速。因此可以利用多尺度 Retinex 模型对数字 X 光图像进行增强处理, 特别是由于当前数字医学图像的动态范围都大大超出了显示器所能够达到

的动态范围这一现象, 多尺度 Retinex 算法能够进行很好地动态压缩, 以满足在显示器上能够清晰显示的要求, 同时能够很好地提高图像的对比度。

4.1 算法实现

利用多尺度 Retinex(MSR) 方法对医学数字 X 光图像进行增强处理, 可分为以下 4 步骤进行:

(1) 为了实现在不同的标准偏差 σ 下, 对数字 X 光图像进行高斯滤波, 需要计算不同标准偏差下的高斯滤波器的滤波系数 b_i 。

所用的不同标准偏差 σ ^[9], 如下式计算:

$$q = \begin{cases} 0.98711\sigma - 0.96330, & \sigma \geq 2.5 \\ 3.97156 - 4014544\sqrt{1 - 0.26891\sigma} & 2.5 < \sigma \leq 5 \\ 0.1147705 & \sigma > 5, \end{cases} \quad (8)$$

然后, 求高斯滤波器系数 ($b_i, i=0, 1, 2, 3$) 如下:

$$\begin{cases} b_0 = 1.57825 + 2.44413q + 1.4281q^2 + 0.422205q^3 \\ b_1 = 2.44413q + 2.85619q^2 + 1.26661q^3 \\ b_2 = -(1.4281q^2 + 1.26661q^3) \\ b_3 = 0.422205q^3 \\ B = 1 - ((b_1 + b_2 + b_3)/b_0), \end{cases} \quad (9)$$

(2) 在 3 种 σ 尺度下, 使用 3 种不同的高斯滤波系数对图像进行卷积操作。

高斯滤波器的实现使用递归形式^[9], 把输入数据 $\text{in}[n]$ 通过前向滤波和后向滤波得到高斯滤波的输出结果 $\text{out}[n]$, 如图 1 所示。

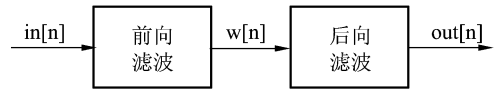


图 1 两个滤波器串联的高斯滤波器

Fig. 1 Gaussian filter as concatenation of two filters

其中前向滤波由式 (10) 决定; 后向滤波由式 (11) 决定。

$$w[n] = \text{Bin}[n] + (b_1 w[n-1] + b_2 w[n-2] + b_3 w[n-3])/b_0, \quad (10)$$

$$\text{out}[n] = Bw[n] + (b_1 \text{out}[n+1] + b_2 \text{out}[n+2] + b_3 \text{out}[n+3])/b_0, \quad (11)$$

(3) 利用式 (5) 计算 3 种 σ 尺度下得到结果的加权平均, 权值为 1/3;

(4) 利用式(6)和(7)对输出灰度值进行增益映射,得到可用于显示的结果。

4. 2 试验结果分析

(1)多尺度 Retinex(MSR)算法适宜不同的亮度环境下所获得的图像。由于 MSR 算法是建立在模型(1)基础之上的,因此式(2)中的图像和高斯函数的卷积可以看作是一种邻域平均,则式(2)可以写成如下形式:

$$R_i(x,y) = \log \frac{i_i(x,y)r_i(x,y)}{i_i(x,y) r_i(x,y)}, \quad (12)$$

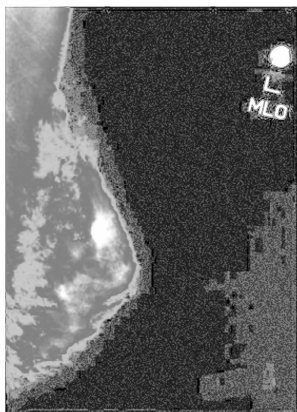
通常环境亮度函数 $i(x,y)$ 变化缓慢,这意味着 $i(x,y) \approx \overline{i(x,y)}$ 成立,则有:

$$R_i(x,y) = \log \frac{r_i(x,y)}{r_i(x,y)}, \quad (13)$$

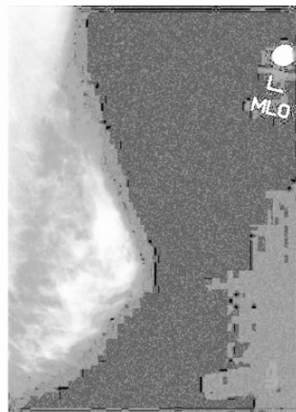
说明该算法的输出结果与图像的环境亮度函数 $i(x,y)$ 无关,表明了该方法能够适用于在各种亮度环境下获得的图像,这对于一些亮度不均、过暗的数字 X 光图像的处理有着很好的增强效果。

(2)几种增强处理算法效果比较

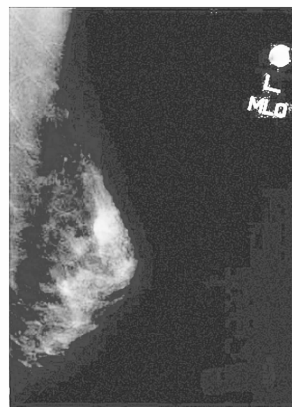
这里将获取的数字 X 光乳腺图像(见图 2(a)原图)进行增强处理,对本文提出的多尺度 Retinex(MSR)算法和其他几种常规的图像增强算法作了比较,包括直方图均衡(Histogram Equalization, HE)和同态滤波法(Homomorphic Filtering, HF),其增强效果如图 2 所示。



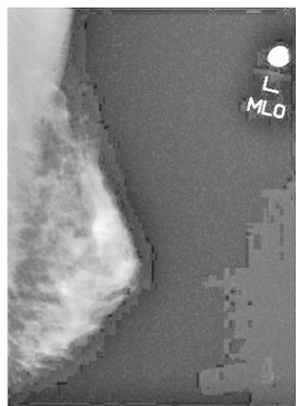
(a)原图
(a)Original image



(b)直方图均衡
(b)Image after HE



(c)同态滤波
(c)Image after HF



(d)MSR 增强
(d)Image after MSR

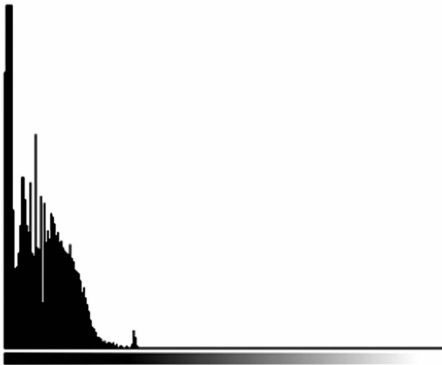
图 2 几种增强处理算法比较

Fig. 2 Comparison of MSR with other techniques

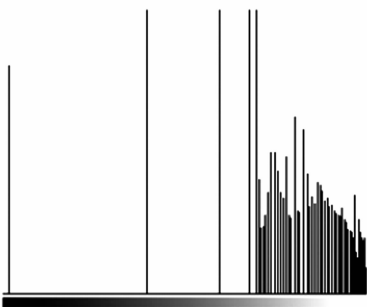
从图 2 中可以看出,在对原图几乎全部暗区、其内信息不可分辨的情况下,通过常规增强方法及 MSR 图像增强算法处理后,比较发现,直方图均衡方法在增强图像的同时,噪声也有了明显的增强,同时有过增强的现象;而同态滤波方法虽

然利用了对数变换的方法来实现动态范围的压缩,但该方法对图像的对比度增强效果不理想,没有提高图像中暗区的可视度;而利用 MSR 图像增强算法能够得到满意的增强结果,图像对比度得到显著提高,并具有一定的锐化效果。由于该算法对原始图像的亮度要求不高,因此能够有效地增强图像中暗区的信息。

同时,图 3 给出了图 2 中几种方法增强后得到的灰度直方图,从灰度直方图可以看出 MSR 增强算法与其他几种常规方法相比,得到了最好的灰度分布,从而使得图像更加清晰。

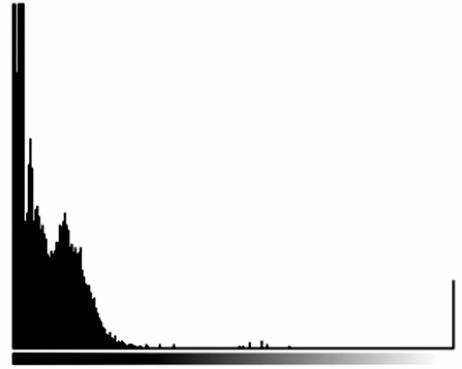


(a)原图灰度直方图
(a) Histogram of original image

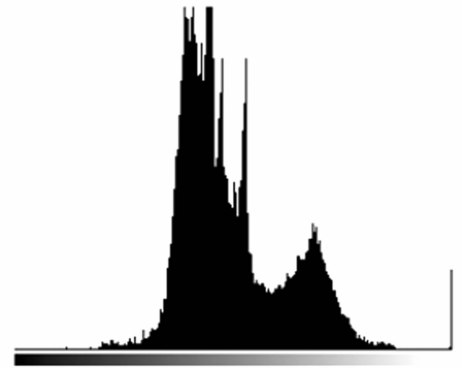


(b)直方图均衡后的灰度直方图
(b) Histogram of image after HE

为了客观、定量地比较几种图像增强算法的效果,利用图像香农信息熵作为衡量图像质量的客观标准^[10],图像熵越大其信息量越多,图像细节越丰富。各种增强算法的图像信息熵如表 1 所示。



(c)同态滤波后的灰度直方图
(c) Histogram of image after HF



(d)MSR 增强后的灰度直方图
(d) Histogram of image after MSR

图 3 几种增强处理后的灰度直方图比较

Fig. 3 Histogram comparison of MSR with other techniques

表 1 增强图像的信息熵

Tab. 1 Entropy of image enhancement

增强方法	原图	直方图均衡	同态滤波	MSR
信息熵	2.610 4	2.565	2.841 5	4.675 1

由表 1 中的信息熵可以看出,利用 MSR 算法增强后的数字 X 光图像,其信息熵最大,几乎是常规增强方法的 2 倍,同时在图 4 中给出了两幅人体不同部位的数字 X 光图像和经过 MSR 方法增强后的结果,从图中可以看出 MSR 方法很好地增强了图像,这些都说明 MSR 方法能够显著地提高数字 X 光图像的质量,有利于医生诊断。



(a)原图

(a)Original image



(b)MSR 增强

(b)Image after MSR



(c)原图

(c)Original image



(d)MSR 增强

(d)Image after MSR

图 4 两幅 MSR 增强图像

Fig. 4 Images of MSR enhancement

5 结 论

多尺度 Retinex(MSR)算法是一种非常有效的、基于人眼视觉原理的图像增强算法,它既能有效地实现数字 X 光图像对比度的增强,同时又能够有效地压缩图像的动态范围,具有广泛的应用领域。本文应用多尺度 Retinex 算法对数字 X 光图像进行增强处理,试验表明它能够有效地提高

图像暗区内细节的可视度,对提高医生的临床诊断准确性有很大的帮助。该方法与其它常规的图像增强方法作了比较,结果表明 MSR 算法具有更好的图像增强效果,其增强后的信息熵是常规增强方法的 2 倍,表现出优良的性能。基于 Retinex 模型的多尺度 MSR 算法是一种非常适合数字 X 光图像增强的算法,因而具有极高的应用价值。

参考文献:

- [1] LAND E. An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision[J]. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 1986, 83:3078-3080.
- [2] ORSINI G, RAMPONI G, CARRAI P, et al. A modified Retinex for image contrast enhancement and dynamics control[C]. *Image Processing 2003 Proceedings. 2003 International Conference on Image Processing. USA IEEE* 2003, 2:393-396.

- [3] RAMPONI G, TENZE L, CARRATO S, *et al.* Nonlinear contrast enhancement based on the Retinex approach[J]. *SPIE*, 2003, 5014:169-177.
- [4] LI T, ASARI V. Modified luminance based MSR for fast and efficient image enhancement[C]. *Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2003. *Proceedings. 32nd Applied Image Pattern Recognition Workshop. Washington, DC, USA. IEEE* 2003, 174-179.
- [5] NGO H, LI T, ASARI V. Design of an efficient architecture for real-time image enhancement based on a luma-dependent nonlinear approach[C]. *Information Technology: Coding and Computing*, 2004. *Proceedings. ITCC 2004. International Conference on. Las Vegas, Nevada, IEEE* 2004. 1:656-660.
- [6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3):451 - 462.
- [7] MOORE A, ALLMAN J, GOODMAN R M. A real-time neural system for color constancy[J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1991, 2:237 - 247.
- [8] 张雷 杨润魁 黄廉卿. 数字 X 光医学影像压缩技术[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(6):632-637.
ZHANG L, YANG R K, HUANG L Q. Computed X radiography image compression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6):632-637. (in Chinese)
- [9] IAN T. YOUNG L J, VLIET V. Recursive implementation of the Gaussian filter[J]. *Signal Processing*, 1995, 44: 139-151.
- [10] 迟学芬 韩昌元. 基于信息理论的采样成像系统评价方法[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(2):207-211.
CHI X F, HAN C Y. Assessment of sampled imaging system based on information-theory[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2003, 11(2):207-211. (in Chinese)

作者简介:王彦臣(1976—)男,黑龙江牡丹江人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事计算机图像处理方面的研究。E-mail:wangycemail@yahoo.com.cn;