

人眼视觉特性与粗糙集结合的 X 射线图像增强算法

欧阳诚苏¹, 袁军², 田军委¹, 黄永宣¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安西京光电仪器有限公司, 710068, 西安)

摘要: 针对 X 射线图像的低亮度及噪声造成的图像对比度差和图像模糊的问题, 提出了一种采用粗糙集理论和人眼视觉系统特性的图像增强算法(HREM)。先将原始图像进行灰度拉伸, 再结合人眼视觉系统特性, 利用粗糙集理论将图像分成边缘细节图像和平滑图像, 然后对边缘细节图像做指数变换增强, 对平滑图像做直方图均衡化, 最后将处理好的两子图进行重叠, 同时消除重叠后图像的随机脉冲噪声。实验结果表明, HREM 方法不仅能较好地保持图像的边缘细节信息, 有效地增强原图像的对比度, 而且消噪能力强, 整体视觉效果好。

关键词: X 射线图像; 粗糙集理论; 人眼视觉系统; 图像增强

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0048-04

An Enhancement Method for X-Ray Image Using Rough Sets and Human Visual System

OUYANG Chengsu¹, YUAN Jun², TIAN Junwei¹, HUANG Yongxuan¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Xijing Optical and Electrical Instrument Co. Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: The X-ray image from direct digital radiography system is captured in non-uniform and low illumination conditions, and is blurred by noise. A new enhancing method is proposed on the basis of rough set theory and human visual system (HREM). The grays of the original image are stretched, and then the stretched image is used to generate two new images (edge-detail image and smooth image) using the rough set theory and the human visual system. The edge-detail and smooth images are enhanced by the exponential transform and histogram equalization, respectively. Finally, the two enhanced images are overlapped into one image, and the random impulse noise in the overlapped image is reduced. Experimental results show that the HREM method can suppress noise while preserving edge and detail element, and enhance visual effect effectively.

Keywords: X-ray image; rough set theory; human visual system; image enhancement

因受拍摄环境、X 光剂量、图像传感器及图像传输等条件的限制, 由 X 光直接数字成像系统(CCD-DDR)获取的 X 光医学图像均匀性差、亮度低、对比度差且含有噪声, 不能很好地为医师提供正确的信息^[1-2], 所以在 X 光医学图像处理中, 图像增强占重要地位。当前图像增强算法很多, 常规的图像增强算法如直方图均衡化、小波变换等, 但它们一般都采取对整幅图像进行增强处理^[3-4], 没有考虑到人眼视觉系统的特性。由于图像是由观察者的眼睛来观察

识别的, 所以在图像处理的过程中应充分考虑到人眼的视觉特性。本文提出了一种基于人眼视觉特性和粗糙集的增强算法(HREM), 充分利用了粗糙集算法在处理模糊和不精确性问题上的优势^[5-6]。HREM 算法先将图像灰度进行拉伸, 再利用粗糙集将拉伸后的图像分割成边缘细节和平滑两幅子图, 对两幅图像做不同的增强处理, 然后将处理好的两幅子图进行重叠融合, 最后对融合的图像做消噪处理。实验结果表明, 这种方法既能有效地增强图像边

缘细节和局部细节,又能很好地抑制噪声,达到了较好的视觉效果。

1 粗糙集结合视觉特性的图像增强原理

1.1 人眼视觉系统特性及图像区域划分

医师对医用图像的准确分析是正确诊断的基础。由文献[7-9]可知,人眼对边缘细节和平滑区域的感觉是有差异的,由此将图像分割成边缘细节和平滑两部分,对这两部分分别进行处理。分割的依据为图像灰度值变化率梯度。

设图像 F (大小为 $M \times N$) 的像素点 $f(i, j)$ 的梯度为

$$\left. \begin{aligned} Z(i, j) &= \max\left(\frac{|\Delta I|}{3}, \frac{|\Delta J|}{3}\right) \\ \Delta I &= f(i+1, j-1) + f(i+1, j) + f(i+1, j+1) - \\ &\quad (f(i-1, j-1) + f(i-1, j) + f(i-1, j+1)) \\ \Delta J &= f(i-1, j-1) + f(i, j-1) + f(i+1, j-1) - \\ &\quad (f(i-1, j+1) + f(i, j+1) + f(i+1, j+1)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i, j ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 为点 $f(i, j)$ 的坐标位置; $\Delta I, \Delta J$ 分别为 $f(i, j)$ 的水平梯度和与垂直梯度和; $Z(i, j)$ 为 $f(i, j)$ 的最大梯度值。本文将梯度大于阈值 W 的像素点定义为图像的边缘细节区域,将小于等于 W 的像素点定义为平滑区域。

1.2 粗糙集理论及 HREM 的构思

在粗糙集理论^[5,10]中, $S = \langle U, A, V, G \rangle$ 为目标信息系统或决策表,其中 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 称为论域,是由研究对象组成的一个非空有限集, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 为属性集,也是一个非空有限集, $V = \bigcup_{a \in A} V_a$, 其中 V_a 是属性 a 的定量描述, G 称为信息函数或者决策函数,即

$$G: U \times A \rightarrow V, G(x, a) \in V, x \in U, a \in A$$

分类和特征归纳为粗糙集理论的典型应用,粗糙集利用多个集合(如上近似集和下近似集)来描述一个传统意义上的集合,并认为同一集合内的样本属于同一等价类,具有不可分辨性。

利用等价关系 R 将 U 分成 n 份,表述成

$$U/R = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (2)$$

式中: $X_i \subseteq U, i=1, 2, \dots, n, X_i \cap X_j = \emptyset, i, j=1, 2, \dots, n, i \neq j, \bigcup_{i=1, 2, \dots, n} X_i = U$ 。

在粗糙集理论中,集合 X 边界的描述是含糊的,是否属于该集合是不确定的。为了描述集合边界

的含糊性,粗糙集理论给出的集合 X 的 R 上近似和 R 下近似为

$$R^+ = \{x \in U: [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \quad (3)$$

$$R^- = \{x \in U: [x]_R \subseteq X\} \quad (4)$$

本文对图像进行分类处理,首先将一幅灰度级为 L 的 $M \times N$ 个像素点的二维图像看成一个信息系统,其论域 U 的组成成员是 $M \times N$ 个像素点的灰度值。

在本文的算法中,定义条件属性 $A = \{a_1, a_2\}$, 其中 a_1 是像素梯度属性, a_2 为噪声属性。梯度属性 $a_1 = \{0, 1\}$, 其中 1 代表像素梯度大的,满足 $Z(x, y) > W$ (设定阈值), 0 代表像素梯度小的,满足 $Z(x, y) \leq W$; 噪声属性 $a_2 = \{0, 1\}$, 其中 0 代表由 3×3 像素组成的子块 s 的平均灰度值与相邻子块平均灰度值之差的绝对值均小于某一阈值 Q , 1 代表子块差值的绝对值均大于等于 Q 。

按属性 A 分类。根据 a_1 划分子图,设 x 代表梯度较大的像素点, $R_1(x)$ 表示所有梯度较大的像素点 x 组成的集合,即如果 2 个像素点的梯度值均大于阈值 W ,则这 2 个像素点是 R_1 相关的,属于等价类。等价关系 R_1 定义为

$$R_1(x) = \{x \mid Z(i, j) > W\} \quad (5)$$

R_1 的非集 $\bar{R}_1(x)$ 则表示所有梯度小的像素点 x 组成的集合(R 上近似,描述平滑区域)。

根据 a_2 划分子图, $R_2(s)$ 表示所有噪声像素点 s 组成的集合,等价关系 R_2 定义为

$$R_2(s) = \bigcup_i \bigcup_j \{s_{ij} \mid |\bar{m}(s_{ij}) - \bar{m}(s_{i\pm 1, j\pm 1})| > Q\} \quad (6)$$

式中: $s_{ij} = \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 f(i+k, j+l)$; $s_{i\pm 1, j\pm 1}$ 表示 s_{ij} 相邻的子块; $\bar{m}(\cdot)$ 表示取平均值。若子块 s_{ij} 与相邻子块的平均灰度值之差的绝对值均大于给定阈值 Q , 则子块 s_{ij} 与相邻子块 $s_{i\pm 1, j\pm 1}$ 构成宏块。宏块的均值为

$$M_{ij} = \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_{i+k, j+l} \quad (7)$$

将上述 2 种划分的子图合起来,得到剔除噪声后所有梯度值大的像素点集合 F_1 (对应图像的边缘细节)和剔除噪声后所有梯度值小的像素点集合 F_2 (对应图像的平滑部分),即

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= R_1(x) - R_2(s) \\ F_2 &= \bar{R}_1(x) - R_2(s) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

然后,对上面两幅子图分别做增强处理。在本文

实验中,边缘细节子图 F_1 采用指数变换增强后为 F'_1 ,变换式如下

$$F'_1 = \frac{1}{\alpha} (F_1)^\alpha \quad \alpha > 0 \quad (9)$$

平滑子图 F_2 采用直方图均衡化,增强后的图像为 F'_2 . 融合增强后的两幅子图 F'_1 和 F'_2 ,则融合后的图像为

$$F_m = F'_1 + F'_2 \quad (10)$$

融合后的图像因原始图像含有噪声及增强程度不同,从而出现某些孤立的点. 本文采用文献[11]中提出的模糊随机脉冲噪声消除法,对图像 F_m 的噪声点进行如下处理

$$F'_m(i, j) = (1 - \lambda(i, j)) \cdot \frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 F_m(i+k, j+l) \omega(i+k, j+l)}{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 \omega(i+k, j+l)} + \lambda(i, j) F_m(i, j) \quad (11)$$

式中: λ 为控制校正量参数; ω 为对应像素点的权重. 本文令 $\omega(i, j) = \mu_{\text{sim}}(F_m(i, j))$, $\mu_{\text{sim}}(F_m(i, j))$ 为邻域的相似程度,详细情况请参考文献[11]. 本实验采用 $\lambda(i, j) = \omega(i, j)$.

2 HREM 方法的实现

由于 X 射线图像受剂量的限制,一般照度很低,在对图像进行处理时,本文首先将原始图像 F 进行如下灰度拉伸变换

$$F_L(i, j) = \frac{f(i, j) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (12)$$

式中: $f(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值; $f_{\min}$ 为最小灰度值; $f_{\max}$ 为最大灰度值. 接下来对图像 F_L 进行增强处理,具体步骤如下:

(1)求图像 F_L 各像素点的梯度值;

(2)按式(8)将图像 F_L 分成 F_{L1} 和 F_{L2} ,将 F_{L1} 子图补充,即在所有梯度小的像素点和噪声像素点的位置处,分别用 $L/2$ (L 代表灰度等级)的灰度值和 M_{ij} 补充,将 F_{L2} 子图补充,即在所有梯度大的像素点和噪声像素点的位置处,分别用 $L/2$ 的灰度值和 M_{ij} 补充;

(3)分别对子图 F_{L1} 和 F_{L2} 做增强变换,即 F_{L1} 按式(9)增强, F_{L2} 进行直方图均衡化,分别得到图像 F'_{L1} 和 F'_{L2} ;

(4)从 F'_{L1} 中去掉 F_{L1} 中补充的元素,从 F'_{L2} 中去掉 F_{L2} 中补充的梯度大的元素,而必须保留噪声像素位置处的元素;

(5)按式(10)对 F'_{L1} 和 F'_{L2} 进行重叠融合,以保证重叠后所有元素的灰度值不超过灰度等级 L ,得到增强图像 F_{Lm} ;

(6)对图像 F_{Lm} 进行去噪.

特别指出在步骤(4)中子图 F'_{L1} 和 F'_{L2} 去掉补充的元素时,必须考虑要保留一个子图的噪声位置处值,若两子图全去掉,重叠后图像在噪声位置处会出现黑点,从而引入噪声.

3 实验结果与分析

本文算法用 matlab6.5 实现,平台为 Pentium (R)D CPU2.80 GHz 2GB 内存. 实验对象为 Apo-gee CCD 拍摄的手透视的 X 光图,截取大小为 2469×1247 像素的手部位置. 采用本文增强算法(HREM)与中值滤波(MD)、直方图均衡化增强(HEM)、多层小波分解增强(WE)以及文献[10]中提出的增强算法(BMREM)作了仿真对比,比较结果如图1所示. 为客观评估增强后图像的质量,本文利用像素点灰度值的均方误差(E_{MS})、峰值信噪比(R_{PSN})[12-14],以及文献[15]中提出的图像感知质量评价模型(PBAM)的感知质量(Q_p)对增强图像进行定量评价,结果如表1所示.

从图1中可以看出,直接对原始手部 X 光图像进行中值滤波、直方图均衡化以及小波增强处理的图像很不清晰,未达到满意的增强效果. 从表1中相应的 E_{MS} 和 R_{PSN} 也可以看出,处理后的图像与参考图像的偏差较大. 针对 X 光图像的亮度低及拍摄照度不均匀造成的问题,对原始图像进行灰度拉伸变换(LSI)后,再做中值滤波(LSI-MD)、直方图均衡化(LSI-HEM)和小波增强(LSI-WE),如图1i~图1k所示. 由图1可以看出,经过先拉伸后增强处理的图像比直接增强处理的效果好. 在几种增强处理算法中:中值滤波使图像边缘和细节模糊;直方图均衡化不但细节得不到保持,而且噪声未能抑制;小波增强去除了高频信息,丢掉了部分细节,使图像看起来不够锐. BMREM 方法考虑到了人眼视觉特性,但是在增强边缘细节的同时,也使得图像的噪声增大,图像的恶化比较明显;本文的 HREM 算法处理的图像视觉效果最好. 从表1中的指标也可以看出, HREM 算法所对应的综合指标较其他算法要好. 实验中, HREM 和 BMREM 算法的阈值取 $W=0.015$, $Q=0.05$, $\alpha=0.8$.

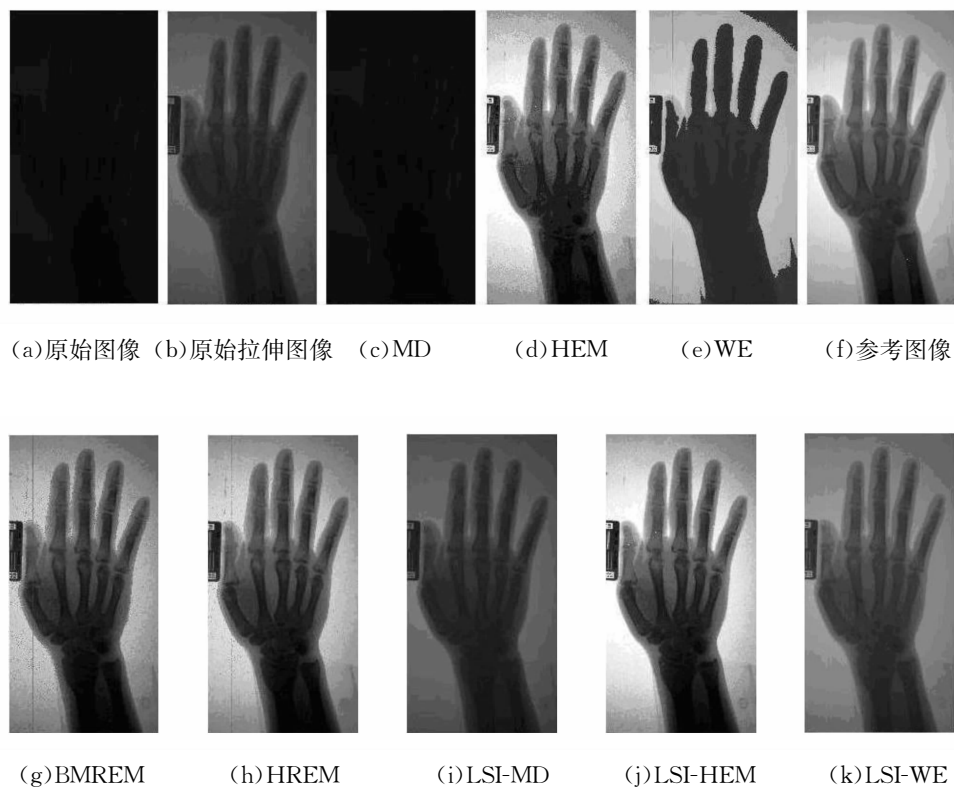


图 1 采用不同算法对手部 X 光图像进行处理的结果

表 1 各种增强算法的定量指标结果

参数	BMREM	HREM	MD	HEM	WE	LSI-MD	LSI-HEM	LSI-WE
E_{MS}	0.002 9	0.002 6	0.251 3	0.003 5	0.224 0	0.075 6	0.003 4	0.002 6
R_{PSN}	27.105 3	27.805 5	-16.893 6	24.580 4	-8.986 8	4.802 8	24.686 6	27.861 9
Q_P	5.275 3	5.275 2	5.273 7	5.275 6	5.273 6	5.275 8	5.275 3	5.276 2
t/s	10.140 0	16.265 0	1.578 0	0.812 0	8.844 0	1.531 0	0.782 0	15.422 0

4 结 论

本文先将 X 光原始图像做灰度拉伸变换,再引入人眼视觉系统特性与粗糙集理论,将图像分成边缘细节和平滑两幅子图,对边缘细节子图做指数变换增强,对平滑子图做直方图均衡化增强,然后将增强后的两幅子图进行融合,最后对融合图像做随机脉冲消噪处理.实验结果表明,利用本文算法增强的 X 光图像,不管是从主观上还是从客观上,能达到一致较好的视觉效果.本文算法既增强了 X 光图像,特别是边缘和细节部分,又抑制了噪声.

参考文献:

[1] Xi'an Xijing Optical & Electrical Instrument Co, Ltd. CCD-DDR system [EB/OL]. (2006-03-06)[2008-10-15]. http://www.xjoptics.com/product_list/PL_6.htm.

[2] 杨莹,牟轩沁,张敏,等.一种医学 X 射线图像动态范

围扩展方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (12): 1468-1471.

YANG Ying, MOU Xuanqin, ZHANG Min, et al. A technique for extending dynamic range of medical X-ray image[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (12):1468-1471.

[3] 刘鹏. 基于小波变换的 X 射线图像增强技术[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2007, 28 (6): 552-555.

LIU Peng. An enhancement technology for X-ray images based on wavelet transform [J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2007, 28 (6): 552-555.

[4] 付丽琴,韩焱,桂志国. 射线图像的对比度增强方法[J]. 无损检测, 2005, 27(9):485-486.

FU Liqin, HAN Yan, GUI Zhiguo. Contrast enhancement algorithms for radiographic image [J]. Non-Destructive Testing, 2005, 27(9):485-486.

[5] 陈德刚,张文修. 粗糙集和拓扑空间[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (12):1313-1315.

- CHEN Degang, ZHANG Wenxiu. Rough sets and the topological space [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35 (12): 1313-1315.
- [6] PAWLAK Z. Rough sets, rough relation and rough functions [J]. Fundament Informaticae, 1996, 27 (8): 2-3.
- [7] COMES S, MACQ B. Human visual quality criterion [C]// Proceedings of SPIE Visual Communication and Image Processing. Bellingham, WA, USA: The International Society of Optical Engineering, 1990: 2-13.
- [8] KARUNASEKERA S A, KINGSBURG N G. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4 (6): 713-724.
- [9] LI T L, SUNDAREHAN M K. Adaptive image contrast enhancement based on human visual properties [J]. IEEE Trans Medical Imaging, 1994, 13 (4): 573-586.
- [10] 张雷, 董德存. 人眼视觉特性引入粗糙集图像增强的研究与仿真[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21 (12): 72-74. ZHANG Lei, DONG Decun. Study and simulations of vision performance applied in rough sets image enhancement [J]. Computer Applications and Software, 2004, 21 (12): 72-74.
- [11] SCHULTE S, DE WITTEE V, NACHTEGAEL M, et al. Fuzzy random impulse noise reduction method [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2007, 158 (3): 270-283.
- [12] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [R/OL]. (2000-04-01) [2008-08-25]. http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv_phaseII/downloads/VQEGII_Final_Peport.pdf.
- [13] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35 (7): 1-4. ZHOU Jingchao, DAI Ruwei, XIAO Baihua. Overview of image quality assessment research [J]. Computer Science, 2008, 35 (7): 1-4.
- [14] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C, et al. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15 (11): 3441-3451.
- [15] 韦学辉, 李均利, 陈刚. 一种图像感知质量评价模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19 (12): 1540-1545. WEI Xuehu, LI Junli, CHEN Gang. A perception based image quality assessment mode [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19 (12): 1540-1545.

(编辑 刘杨)