

基于 Curvelet 变换的 X 射线图像增强

杨振亚^{1,2} 陈裕泉¹ 潘 敏¹

(浙江大学生物医学工程系 杭州 310027)¹ (湖南工业大学电气与信息工程学院 株洲 412008)²

摘 要 针对传统 X-射线图像增强方法中图像细节不够清晰或噪声增强过大的问题,基于数学定义严谨的多尺度几何分析方法 Curvelet 变换,给出了一种灵活的非线性增强函数。首先,对 X-射线图像进行 Curvelet 分解,然后在各精细尺度上对系数按增强函数进行映射,最后根据修正后的 Curvelet 系数重建图像。实验表明,根据所给定的增强函数,Curvelet 变换能有效增强 X-射线图像边缘对比度,细节清晰,噪声小,与传统方法比较,具有更好的视觉效果。

关键词 图像增强, Curvelet 变换, 多尺度几何分析, X-射线图像

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

X-ray Image Enhancement Based on Curvelet Transform

YANG Zhen-ya^{1,2} CHEN Yu-quan¹ PAN min¹

(Dept. of Biomedical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)¹

(Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)²

Abstract Traditional X-ray image enhancement methods have the problem that enhanced image detail is not clear enough or too much noisy. Based on rigorous mathematical defined multi-scale geometric analysis method, Curvelet transform, a flexible non-linear enhancement function was presented. First of all, Curvelet transform was applied to the X-ray image, then, the fine Curvelet coefficients were mapped by the presented enhancement function, and finally the enhanced X-ray image was reconstructed from the amended Curvelet coefficients. The experiment results show that the Curvelet transform can effectively enhance the X-ray image edge contrast by presented enhancement function. The enhanced X-image has better visual effects with clear edge details and smaller noise compared with the traditional methods.

Keywords Image enhancement, Curvelet transform, Multi-scale geometric analysis, X-ray image

X 射线成像广泛应用于工业无损探伤、临床医疗诊断。由于工业现场探测目标、人体结构和组织的复杂性,还有成像设备或获取条件的限制,一般来说,所获得的 X 光图像具有动态范围宽、细节丰富、对比度差的特点。通常需要对图像进行处理,以改善视觉质量,便于对感兴趣区域进行正确判读或后续计算机自动分割等处理。随着 X 光图像数字化,其图像增强技术备受重视,各设备生产厂家都有自己的算法并严格保密,国内中科院^[1]、清华大学^[2]等也正致力于这方面的研究。

图像增强的方法可以分为空域方法和频率域方法,前者如经典的直方图均衡及其改进、Retinex、多尺度 Retinex^[1]等,后者如同态滤波、高频增强^[3]、小波方法^[4,5]等。其中,小波方法对 X 射线图像细节增强有比较好的效果和应用^[4]。

小波多分辨率分析在诸多领域取得了非常成功而广泛的应用。但它主要适用于表示具有各项同性(isotropic)奇异性的对象,对二维图像的表示并非最优。为了有效表示二维图像的边缘特征及三维图像的丝状物和管状物特征,多尺度几何分析(MGA; Multiscale geometric analysis)方法近十年来不

断被提出和研究,并得到越来越多的研究和应用^[6]。目前,较受重视的 MGA 方法有 Emmanuel J Candes 与 David Donoho 提出并完善的 Curvelet 变换^[6]与 M N Do 和 Martin Vetterli 提出的 Contourlet 变换^[7]。Curvelet 变换的函数近似和算子理论有严谨的数学基础^[8],其数字实现算法效率较高。它是一个非常值得关注的新方向,目前已经在图像去噪方面取得较多成功的应用^[9]。

针对 X 射线图像增强,基于 Curvelet 变换多尺度、各向异性的特点,本文给出了一种灵活的非线性增强曲线,对分解后的 Curvelet 精细尺度系数作加权处理,再根据处理后的系数重建,获得增强图像。增强后的 X 射线图像具有良好的视觉效果,与传统方法相比,所获得的细节更多,更清晰,噪声小。

1 Curvelet 变换基本原理及其数字实现

Curvelet^[9]是 Candes 于 1998 年提出的一种多尺度分析方法,被称作第一代 Curvelet 变换。它比小波更进一步的是,引入了方向特征和各向异性尺度关系的概念^[5,10]。它以

到稿日期:2009-04-28 返修日期:2009-08-08 本文受国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD30B03)资助。

杨振亚(1968—),男,博士生,讲师,CCF 会员,主要研究方向为图像处理、生物医学信号处理等, E-mail: yangzhenya@zju.edu.cn; 陈裕泉(1944—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为生物医学信息处理、生物传感器等; 潘 敏(1968—),男,博士,副教授,主要研究方向为生物医学信息处理、生物传感器等。

Ridgelet 分析为核心,需要塔式子带分解、平滑分块、正规化等复杂步骤,有大量数据冗余。

2004 年, Candes 与 Donoho 提出了第二代 Curvelet(以下简称 Curvelet)方法,其对 Curvelet99 做了很大改进^[8],在构造上已经完全不同,相同点仅在于紧支撑、框架等抽象的数学意义。Curvelet 变换概念更简洁,实现更方便,运算速度更快,数据冗余度更小。

在二维空间 R^2 中, x 为空间变量, ω 为频率变量, γ, θ 是频率域极坐标。对于所有尺度变量 $j \geq j_0$, 引入定义在傅立叶域的频率窗^[8]:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-\frac{3j}{4}} W(2^{-j}r) V\left(\frac{2^{\frac{j}{2}}\theta}{2\pi}\right)$$

其中, $\lfloor \frac{j}{2} \rfloor$ 表示对 $\frac{j}{2}$ 取整, $W(\gamma)$ 和 $V(t)$ 分别是满足一定容许条件的“半径窗”和“角度窗”。

定义波函数 $\varphi_j(x)$ 为母 Curvelet, 其傅立叶变换 $\hat{\varphi}_j(\omega) = U_j(\omega)$ 。则尺度 2^{-j} 下的所有 Curvelets 都能通过对 φ_j 进行旋转和平移得到:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)}))$$

其中, R_{θ} 是旋转矩阵, l 是角度参数, $k = (k_1, k_2)$ 是平移位置参数。

于是 Curvelet 变换可以表示为二维图像函数 f 与 $\varphi_{j,l,k}$ 的内积:

$$c(j, l, k) \triangleq \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}(x)} dx \quad (1)$$

从 Curvelet 系数重建图像函数是式(1)的逆过程:

$$f = \sum_{j,l,k} \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle \varphi_{j,l,k} = \sum_{j,l,k} c(j, l, k) \varphi_{j,l,k}$$

Curvelet 变换具有紧框架、各向异性尺度关系、过主“脊”振荡等特性,具有优良的对二维函数稀疏表达的能力。Curvelet 基元在空域表现为一个过主“脊”振荡的小针形,其长度和宽度近似满足各向异性尺度关系:

$$length \approx 2^{-\frac{j}{2}}, width \approx 2^{-j} \Rightarrow width \approx length^2$$

一个精细尺度下的 Curvelet 基元空域形状如图 1 所示。在进行 Curvelet 分析时,若 Curvelet 基元与图像边缘重合则有强的响应系数,否则系数响应小。在某个尺度下, Curvelet 基元经过旋转、平移,据此对各个方向图像边缘捕获,获得图像的稀疏表达。在多个尺度下对图像进行 Curvelet 分解,最终获得图像的多尺度各向异性稀疏系数表达。



图 1 精细尺度下的一个 Curvelet 基元的空域形状

Candes 与 Demanet 给出了两种 Curvelet 快速数字实现算法^[11]。一种是基于非均匀采样的快速傅立叶变换 US-FFT,另一种则是基于频率域特殊采样的卷绕规则 Wrapping 算法。它们都是在频率域对傅立叶系数进行重采样,但

Wrapping 算法更加准确高效,而且其逆运算是封闭的,这里采用 Wrapping 算法实现 Curvelet 变换。

2 基于 Curvelet 变换的图像增强

Curvelet 变换能够很好地捕获“沿边缘”的奇异性,适合描述带边缘图像。由于 Curvelet 变换的多尺度、各向异性,对精细尺度内的各方向系数块按某个增强函数进行适当加权处理后重建就可以增强图像。

2.1 增强函数

在基于小波方法的图像增强中都会定义增强函数,一般来说是一个非线性函数^[12,13]。一个合适的增强函数对增强效果非常重要,它决定了增强策略。为了对 Curvelet 系数进行调整,受 Jean-Luc Starck^[14] 的启发,我们定义非线性函数:

$$T(x) = \begin{cases} k & \text{if } x < c\sigma \\ \frac{x - c\sigma}{c\sigma} \left(\frac{m}{x}\right)^p + \frac{2c\sigma - x}{c\sigma} & \text{if } x < 2c\sigma \\ \left(\frac{m}{x}\right)^p & \text{if } 2c\sigma \leq x < m \\ \left(\frac{m}{x}\right)^s & \text{if } x \geq m \end{cases}$$

作为增强函数。其中, p 代表曲线的非线性度, s 表示对大系数的抑制。 σ 是图像噪声标准差, c 作为 σ 的系数起规范化作用。特别地,这里引入比例系数 k 来控制零附近 Curvelet 小系数的加权,当 $k=1$ 时,零附近的 Curvelet 小系数保持不变,而 $k < 1$ 时,则对小系数进行衰减。 m 是一个比较重要的参数,一般来说,小于 m 的系数都会被放大。显然 m 值的确定应该与当前 Curvelet 尺度下被处理的图像像素信息相关联。这里选择当前 Curvelet 系数块内最大值的 80% 作为 m 的值,也可以根据实际需要进行调整。

在增强图像的同时可以抑制图像噪声,通过调整参数 c 和 m ,能够调整细节增强和噪声抑制的范围,改变 k 值的大小则可以调整噪声抑制的程度。

图 2 给出了一种归一化的增强函数图形,参数取值为 $\sigma = 2.6, m = 80, c = 0.4, s = 0, p = 0.5, k = 0.5$ 。通过调整各个系数还可以得到更多的增强曲线样式。

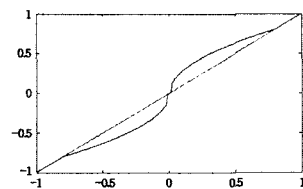


图 2 归一化的增强函数图形示例

在实际应用中,图像噪声标准差 σ 一般未知,这里根据 Donoho 与 John stone 的方法^[15] 进行估计。其经验公式是 $MAD/0.675$,其中 MAD 表示 HH 小波高频子带系数幅值的中值。

2.2 算法描述

- 1) 估计输入图像的噪声标准差;
- 2) 对输入图像做 Curvelet 变换,得到粗尺度系数及一系列高频子带精细尺度系数 $c(j, l)$;
- 3) 对每个精细尺度 j 下的每个方向块 l :
 - 计算该系数块的最大值;

• 根据增强函数 $T(x)$ 对每一个 Curvelet 系数进行映射
 $c_m(j, l) = c(j, l) \cdot T(c(j, l))$;

4) 根据修改后的 Curvelet 系数 $c_m(j, l)$ 重建, 得到增强图像。

3 实验与分析

以一张原始大小为 602×418 像素的 X 光胸片^[3] 为样本对算法进行测试。这张胸片整体灰度偏低, 细节对比度不高, 视觉效果较差。分别使用对比度受限自适应直方图均衡 (CLAHE)、小波变换和 Curvelet 变换进行增强。原始图像及各方法增强后所得结果图像如图 3 所示。为了进行更清楚的比较, 在图 3(a) 左上白色方框所示位置对各图像做 100% 局部截图, 如图 4 所示。

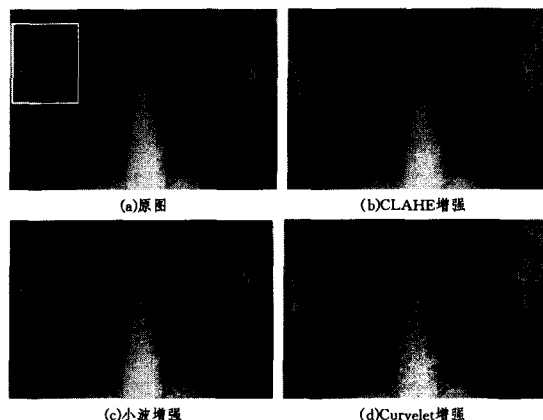


图 3 增强结果

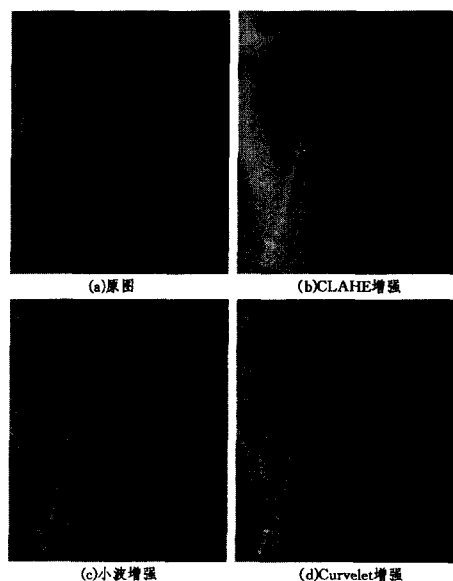


图 4 100% 局部

从直观视觉效果上看, 使用传统增强方法, 无论是直方图均衡还是 CLAHE, 对实验样本增强效果都不尽人意, 虽然对低灰度区域亮度有一定提升, 但很多细节都被淹没了。小波变换增强和基于 Curvelet 变换的增强都能有效增强图像细节, 但 Curvelet 增强效果好于小波方法。通过比较它们的 100% 局部截图可以看出, Curvelet 增强算法 (如图 4(d) 所示) 能得到更多的细节特征而且噪声较小。比如, 图 4(d) 左上角的高密度小孔状区域边缘最清晰、最完整, 导管的可见部分也最长, 证明了依据本文给出的增强函数进行 Curvelet 增强的

优势。

实验还发现, Curvelet 增强效果对 σ 的值比较敏感, 因此对增强图像噪声的准确估计很重要。当被估计过大时, 部分细节系数会被当作噪声处理, 不利于最终的细节增强。通过调整系数 c 可以补偿噪声标准差 σ 估计不准确带来的问题。例如, 使用 Donoho 和 Johnstone 的方法, 实验样本图像的噪声标准差 σ 被估计为 2.5998, 如果直接据此增强, 就会有部分细节损失, 但若调整系数 c 为 0.4, 则可以获得良好的增强效果。这体现了本文所定义的非线性增强函数的灵活性。

结束语 对于 X-射线图像增强, 比较了 CLAHE、小波变换增强和基于 Curvelet 变换的多尺度各向异性增强方法, 根据本文所给的非线性增强曲线, Curvelet 变换方法具有更好的增强效果, 细节边缘清晰, 噪声不明显, 视觉效果良好。本文给出的非线性增强曲线较为灵活, 可以根据需要对参数做适当调整, 以获得最佳视觉效果。

实验表明, 作为数学定义严谨的多尺度几何分析方法, Curvelet 变换能有效捕获图像边缘, 适用于 X-射线图像增强, 有很好的应用前景。

目前对图像增强的客观评价并没有一个公认的标准方法, 本文采用主观评价。寻求对 X-射线图像增强效果的客观评价, 探讨如何避免图像噪声估计偏差给 Curvelet 增强效果带来的影响是下一步要做的工作。

参考文献

- [1] 王彦臣. 基于多尺度数字 X 光图像增强方法的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005: 65-77
- [2] 张辉, 夏明新. 基于 FPGA 的实时 X 线医学图像处理系统[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(1): 39-44
- [3] Gonzalez, Rafael C. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 118-187
- [4] 陈武凡. 小波分析及其在图像处理中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 173-174
- [5] 成礼智, 王红霞, 罗永. 小波的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 297-310
- [6] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981
- [7] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106
- [8] Candes E J, Donoho D L. New tight frames of Curvelets and optimal representations of objects with piecewise-C2 singularities[J]. Comm. on Pure and Appl. Math., 2004, 57: 219-266
- [9] Strack J L, Candes E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670-684
- [10] Candes E J, Donoho D L. Curvelets—a surprisingly effective non-adaptive representation for objects with edges[M]// Rabut C, Cohen A, Schumaker L L, eds. Curves and Surfaces. Nashville, TN: Vanderbilt University Press, 2000: 105-120
- [11] Candes E J, Demanet L, Donoho D L. Fast discrete Curvelet transforms[R]. Applied and Computational Mathematics, California Institute of Technology, 2005: 1-43
- [12] Velde K V. Multi-scale color image enhancement[C]// Proc. Int. Conf. Image Processing. 1999, 3: 584-587
- [13] 吴颖谦, 施鹏飞. 基于小波变换的低对比度图像增强[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 3-7
- [14] Jean-Luc S. Gray and Color Image Contrast Enhancement by the Curvelet Transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 706-717
- [15] Donoho D, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81: 425-455