基于邻域一致性的数字 X 射线图像局部 快速修复算法*

李 金¹, 王妍玮¹, 王达达², 魏 杰³, 于 虹², 张少泉²

(1.哈尔滨工程大学 自动化学院,哈尔滨 150001; 2.云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院,昆明 650217; 3.云南电网公司,昆明 652200)

摘 要:针对工业X射线扫描图像中存在微小异物及裂缝缺陷的特点,提出了一种基于邻域一致性的数字X 射线图像局部快速修复算法。通过分析图像中封闭的连通区域的大小,设置蒙板并记录其坐标,采用从外到内、 由粗到精的非迭代修复方法完成对扫描图像背景的修复过程。实验结果表明,与传统 FOE 和 PDE 修复方法相 比,该算法在保证修复效率的前提下提高了图像的修复质量。

关键词:X射线图像;修复;邻域一致性;快速

中图分类号: TP393.04 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)08-3154-03 doi;10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.093

Fast X-ray image inpainting based on coherence transport

LI Jin¹, WANG Yan-wei¹, WANG Da-da², WEI Jie³, YU Hong², ZHANG Shao-quan² (1. Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Corp, Kunming 650217, China; 3. Yunnan Power Grid Corp, Kunming 652200, China)

Abstract: This paper proposed an effective inpainting algorithm based on coherence transport for the industrial X-ray image low contrast and small defect areas which was similar to the background. Firstly, detecting the closed connected region, which was less than the threshold, was considered to be defective mask. Then, recorded the coordinates of the mask points to forming a closed connected region mask. Finally, used an non-iterative approach from outside to inside to complete the inpainting damaged image background. Experimental results show that the algorithm is better than FOE and PDE algorithms, and it can improve the quality of image restoration effectively and efficiency.

Key words: X ray image; inpainting; contour; coherence transport; fast

0 引言

工业 X 射线检测中,不同时间点采集的图像包含不同的 信息,其中有干燥剂颗粒、金属丝异物、连接件松动及设备的缝 隙等信息,这些不同类型的信息给工业 X 射线故障诊断带来 了困难。通常,X 射线故障诊断中常用的数字剪影方法比较检 测图像与理想背景之间的差异,根据差异作出分析,实现设备 故障诊断。因此,如何有效地根据实时检测图像中的信息还原 出理想状态下无缺陷的图像(理想背景)势在必行。

为了得到理想背景图像,保证图像信息的完整性,需要对 检测图像中的缺陷区域进行填充修复。因此,数字 X 射线图 像修复算法是获取理想背景中的关键技术,也是工业 X 射线 检测中亟待解决的问题。

数字 X 射线图像修复(image inpainting)技术是指对一幅 数字 X 射线图像的指定区域的缺损数据进行修复,其内容包 括从图像中剔除指定物体、恢复图像背景中的受损部分。其目 的是根据图像现有的信息来自动恢复丢失的信息,近而达到理 想背景的目的^[1]。

目前,国内外许多学者都在对图像修复技术进行研究,Colombari 等人^[2]研究了视频图像的背景修复技术,提出采集的 多帧视频图像信息,去除运动目标,近而恢复出背景图像的方 法,但这种方法是在假设多幅度图像相互之间没有遮挡的前提 条件下进行的,并未涉及根据单幅图像恢复背景的技术。 Hesabi等人^[3]基于结构和纹理双变量分解的图像复原算法,利 用结构算法重建原图像,这种方法主要应用于彩色图像的恢 复,而工业X射线扫描图像是灰度图像,干扰信息与背景信息 不易通过结构变量进行区分,因此,对于工业X射线检测图像 需要特定的方法对其进行修复处理,以恢复背景图像。

由于工业 X 射线检测图像中的缺陷往往是设备运行中微 小的杂质、松动的螺丝及设备的裂痕,因此,对于小尺度缺损图 像常常采用基于偏微分方程(partial differential equation, PDE) 的图像修补技术^[4]。其基本思想是利用待修补区的边缘缺陷 信息,采用一种由粗到精的方法来估计等照度线(isophote)的 方向,并采用传播机制将信息传播到待修补的区域内,以得到

收稿日期: 2011-11-30; 修回日期: 2012-01-04 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(GK2040260124); 云南电网公司 2012 年科技项目(K-YN2012-166)

作者简介:李金(1962-),女,教授,博导,博士(后);王妍玮(1982-),女,博士研究生,主要研究方向为图像处理(xianxinyue@163.com);王达达 (1972-),男,高级工程师,主要研究方向为电力技术;魏杰(1970-),男,高级工程师,主要研究方向为电网管理;于虹(1978-),女,博士(后),主要 研究方向为状态检修、无损检测;张少泉(1964-),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化. 较好的修补效果。这种方法来源于物理学中的热扩散方程, 其典型的方法包括采用三阶 PDE 来模拟平滑传输过程来模拟 BSCB (Bertalmio-Sapiro-Caselles-Ballester)模型和 CDD (curvature driven diffusions)模型的方法^[5]。这两种传统的方法都是 基于偏微分方程的处理方法,在此基础上,提出了使用欧拉一 拉格朗日方程的全变分 total variational (TV)模型^[6]、Mumford-Shah 模型^[7]和 Mumford-Shah-Euler 模型^[8]等。由于偏微分方 程与变分法是可以通过变分原理相互等价推出的,因此,这类 方法统称为基于变分 PDE 的图像 inpainting 算法。

自然图像的连续性和光滑性是建立先验模型的基础,而且 自然图像中包含大量的颜色信息量,背景与目标的差异大,因 此,上述方法都能很好地实现自然图像中旧图画的修复、有颜色 剥落的旧照片的修复、有划伤的旧电影的修复、旧书报上的笔 迹、图片上印的标题文字的去除,及压缩图像和视频的编码纠正 等;而对于工业 X 射线扫描图像,其类型是灰度图像,大多数像 素都分布在极窄的一部分,异物图像与背景图像差异不大,因 此,有必要研究一种 X 射线图像复原算法以有效去除检测的 数字 X 射线图像中的干扰信息,近而得到理想的背景图像。

目前存在两大类图像修复技术,其中一类是用于修复小尺 度缺损的数字图像修补(inpainting)技术。这种技术最早是由 Bertalmio 等人引入到图像处理中^[9],他们利用待修补区域的 边缘信息,同时采用一种由粗到精的方法来估计等照度线 (isophote)的方向,并采用传播机制将信息传播到待修补的区 域内,以便得到较好的修补效果。考虑到图像修复效率的问 题,Bornemann 等人于 2007 年提出快速的图像修复算法,采用 非迭代的方式恢复图像背景,且处理效果优于 Bertalmio 等人 所提出的 PDE^[10]模型的方法。

鉴于对效果和修复时间考虑,本文针对工业 X 射线扫描 图像的局部缺陷采用基于邻域一致性的非迭代快速修复算法, 以实现工业 X 射线扫描图像缺陷检测中的背景修复问题。本 文算法是对文献[11]中 Telea 提出的 FMM(fast marching method)模型的改进,并成功应用在工业 X 射线背景复原处理中。

1 FMM 原理

1.1 缺陷点修复

Telea 提出的 FMM 修复模型,其图像修复速度快且效果 好,因而得到广泛应用,图1为 FMM 修复原理图。



像素点 x 为 X 射线扫描图像中的缺陷区域 D 的边界 ∂D 上的点,y 为像素点的 $B_s(x)$ 的已知邻域点,对点x 的修补由邻 域已知像素点 y 决定,当点 x 与 y 之间的欧氏距离 ε 趋于 0 时,y 点的像素值 I(y)和梯度 $\nabla I(y)$ 的一阶近似值为

$$I_{y}(x) = I(x) + \nabla I(y)(y-x)$$
(1)

$$I(y) = \frac{\sum_{y \in B_{\mathcal{E}}(x)} w(x,y) [I(y) + \nabla I(y) + \nabla I(y)(x-y)]}{\sum_{y \in B_{\mathcal{E}}(x)} w(x,y)}$$
(2)

其中权函数为

$$w(x,y) = \operatorname{dir}(x,y) \times \operatorname{dst}(x,y) \times \operatorname{lev}(x,y)$$
(3)

$$\operatorname{dir}(x,y) = \frac{x-y}{\|x-y\|} \times N(y) \tag{4}$$

$$dst(x,y) = \frac{u_0}{\|x - y\|}$$
(5)

$$\operatorname{lev}(x,y) = \frac{I_0}{1 + |T(x) - T(y)|}$$
(6)

其中:方向因子 dir(x, y)保证了邻近法线方向, $N = \nabla T$ 的像素 点 y 对修复像素点 x 权值贡献程序;几何距离因子 dst(x, y)保 证了远离点 x 的像素点 y 对 x 的影响程序;水平集距离因子 lev(x, y)保证离像素点 x 的待缺陷区域的轮廓线较近的 y 的 像素点; d_0 和 T_0 的初始值为 1。

1.2 缺陷区域修复

通过点修复可实现对边界点 ∂D 的边缘修复过程。为了实现对缺陷区域的修补,采用由外到内依次推进的修补方法,直到D为0终止。通过求解 Eikonal 方程来实现T值以从小到大的顺序逐像素点进行修复直至D为0的过程。Eikonal 方程是表示曲线随时间进化的过程,T(x,y)到达点(x,y)的时间,满足方程:

$$|\nabla T|v(x) = \varphi(x) \tag{7}$$

将上式两边取平方后利用差分格式求解,可得平面二维 图像:

$$\max(T_{x,y} - T_{x-1,y}, T_{x+1,y} - T_{x,y}, 0)^{2} + \max(T_{x,y} - T_{x,y-1}, T_{x,y+1} - T_{x,y}, 0)^{2} = 1$$
(8)

其中,T的水平集表示不断减小的D的边界; ΔT 表示 ∂D 的法 线N。FMM模型保证缺陷修补区域由外层至里层依次修补。

2 邻域一致性修复算法

2.1 X射线图像修补原理

工业 X 射线扫描图像中缺陷主要有设备裂纹、金属丝、微 粒、干燥剂等,随着 X 射线扫描图像对变电站设备进行非接触 式无损检测技术的发展,图像缺陷检测技术也得到广泛发展, 其基本原理主要是利用数字剪影技术比较检测图像与背景图 像间的差异,因此,X 射线扫描图像的背景复原技术是缺陷检 测中的关键技术。工业 X 图像背景复原技术的基本思想是利 用缺陷周围信息来填补缺陷,以得到理想的背景图像。

工业 X 射线扫描图像的缺陷是小范围破损图像,且在空间上具有连通性。因此,利用边缘检测算子提取图像边缘,再经过二值化和数学形态学膨胀运算得到图像的连通域;当连通域范围小于设定阈值时,则认为是检测图像中的蒙板;再利用蒙板确定的区域,记录其坐标,采用从外到内、由粗到精的非迭代的修复方式完成破损图像背景的修复。

2.2 邻域一致性快速修复算法

缺陷检测的区域是在图像中的小范围区域。与 FMM 模型不同,邻域一致性快速修复算法将待修补区域分为内外两层,两层区域均是根据图中已知的灰度背景信息进行修补完成的。图 2 为缺陷检测区域及邻域示意图,图 3 为缺陷区域邻近修复点查找。

设 Ω 表示整个图像区域,T待修补区域,其中T > T(x)时为修补区域内部,T < T(x)为修补区域外部。当修补区域中一点x,其定义域距离 $x \to \varepsilon$,则其领域值 $B_{\varepsilon}(x)$ 为



改进的 FMM 点修复原理 图 2

 ∂ ∇ *T* 为待修复图像区域的边缘信息,则基于水平集的图 像修补算法权函数可表示为

$$w(x,y) = \frac{|\nabla T(x) \times (x-y)|}{|x-y|^2}$$
(10)

则 ∇T 移动到T内部下一个待修补的区域边缘 $\nabla T, y$ 为与x邻 近的内外区边界上的像素点,对内外两层区域分别采用 FMM 算法进行推进,这保证了填补后的图像更多的利用缺陷邻近已 知的背景信息进行有效的修补,以保证修补后图像的真实性和 邻域一致性。

图3中灰色为已知区域,白色为待修补区域,则箭头表示 修补区域在邻域贡献。



图 3 缺陷检测邻域修复点查找

3 实验结果及分析

实验中的图像是由 ERESCO 65MF4 X 射线机对云南电网 公司的 GIS 设备进行实时检测而得,图像为 2 048 × 2 048 像素。

图 4(a) 为扫描图像中含有金属丝异物,(c) 为设备中含有 干燥剂颗粒,(e)为设备中含有小螺丝异物;针对不同的缺陷 情况,(b)、(d)、(f)为对应缺陷背景恢复后的图像。



(d)缺陷背景修补图像 (e)小螺丝缺陷检测

(f)缺陷背景修补图像 图4 检测图像与背景修补对比

图 5 为不同算法的对有文字覆盖的螺丝的处理效果,原图 为438×297 像素,图5(a)为含有文字覆盖的螺丝 X 射线扫描 图像,(b)为采用 FOE 算法恢复的效果,(c)为采用迭代 PDE 恢复的效果图,(d)为本文算法恢复的效果图。



图5 不同方法X射线复原处理效果

从处理结果可知,本文算法和 FOE 算法可得到较好的复

原图像,而有限次迭代的 PDE 算法复原效果不好,复原后图像 中仍含有部分英文字母痕迹。

表 1 处理时间及指标对比			
指标	本文算法	FOE	迭代 PDE
时间/s	1.022423	171.2748	14.025166
MSE	3.9667	3.9669	3.9666
PSNR/dB	42.1467	42.1472	42.1469

由表1可知,本文算法的处理时间短,且 MSE 和 PSNR 性 能与 FOE 和迭代 PDE 相当。从处理的图像效果可知, PDE 算 法多次迭代后效果仍不理想,修复速度较慢;FOE 算法复杂度 高,修复后图像质量好,但处理时间长。

从算法对比图像可知,与传统 FOE 和 PDE 修复方法相比, 本文算法在保证修复效率的前提下提高了图像的修复质量。

4 结束语

针对工业X射线扫描图像特点,本文研究了基于邻域一 致性的数字 X 射线图像局部快速修复算法。本文算法能较好 地实现工业 X 射线扫描缺陷图像的背景修复。实验结果表 明,设计的算法可以较好地处理工业设备检测中的金属丝异 物、干燥剂颗粒、铜颗粒及小螺丝异物的背景图像复原:从算法 对比中可知,与传统 FOE 和 PDE 修复方法相比,本文算法在保 证修复效率的前提下提高了图像的修复质量。

参考文献:

- [1] 张红英,彭启琮.数字:图像修复技术综述[J].中国图象图形学 报,2007,12(1):1-9.
- [2] COLOMBARI A, FUSIELLO A. Patch based background initialization in heavily cluttered video [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2010,19(4):926-933.
- [3] HESABI S, JAMZAD M, MAHDAVI-AMIRI N. Structure and texture image inpainting [C]//Proc of International Conference on Signal and Image Processing. [S. l.]: IEEE, 2010:119-124.
- [4] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, et al. Image inpainting [C]//Proc of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2000:417-424.
- [5] BALLESTER C, BERTALMIO M, CASELLES V, et al. Filling-in by joint interpolation of vector fields and grey levels [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 8(10):1200-1211.
- [6] CHAN T F, SHEN J H. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions (CDD) [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 436-449.
- [7] CHAN T F, SHEN J H. Mathematical models for local non-texture inpainting [J]. SIAM Journal of Applied Mathematics, 2001, 62 (3):1019-1043.
- [8] CHAN T F, KANG S H, SHEN J H. Euler's elastica and curvature based inpainting [J]. SIAM Journal of Applied Mathematics, 2002,63(2):564-592.
- [9] BORNEMANN F, MARZ T. Fast image inpainting based on coherence transport[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2007, 28(3):259-278.
- [10] BERTALMÍO M. Strong continuation, contrast invariant inpainting with a third-order optimal PDE [J]. IEEE Trans on Image Processing,2006,15(7):1934-1938.
- [11] TELEA A. An image inpainting technique based on fast marching method [J]. Journal of Graphics Tools, 2004, 9(1):25-36.

(9)