

红外热波序列图像的图像分割与三维显示

姜千辉, 姜长胜, 葛庆平, 张存林

(首都师范大学, 北京 100037)

摘要:研究了针对红外热波序列图像的图像分割和三维显示方法。红外热波无损检测只能得到被测工件表面温度变化的时间序列图像,无法直观到检测缺陷,利用三维显示技术可以产生深度三维立体图,方便技术人员更直观、精确地进行无损检测。三维显示效果的好坏直接取决于图像分割的效果。为此提出了基于局部极小值的区域生长分割算法,成功地提取出红外热波图像中缺陷成分的目标图像,并进行了三维显示,取得了较好的效果。

关键词:红外热波;图像分割;三维显示

中图分类号: TG115.28; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)02-0100-04

Segmentation and 3D Display of Infrared Thermal Image

JIANG Qian-Hui, JIANG Chang-Sheng, GE Qing-Ping, ZHANG Cun-Lin

(Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: The segmentation and 3D display method of infrared thermal image were studied. Infrared thermal detecting can not be implemented well because it can only get thermal sequence images, so it is needed to produce three-dimensional images of depth using 3D display technology. 3D display has a direct effect on image segmentation results, so a new algorithm of the region growing segmentation based on the minimization. It successfully extracted the target image of the defect elements and achieved a better result in the 3D display.

Keywords: Infrared thermal wave; Image segmentation; 3D reconstruction

红外热波无损检测技术是一门跨学科的实用技术,具有快速、高效、直观的优点。其核心包括三个部分:热激励、热成像和实时图像处理。

红外热波无损检测技术得到的序列二维图像只能获得某一断面上的二维信息,不能得到被检测物体的整体描述,因此需要三维立体结构图像来帮助技术人员进行更直观、精确的检测,以得到缺陷的位置、形状、尺寸以及性质等信息^[1,2]。红外热波无损检测是利用外部热源作为激励源,对工件加热,红外热像仪记录不同时刻工件表面的温度分布,工件内部不同深度的信息在工件表面显现的时间不同,计算机采集到的数据图像序列就会反映内部不同的

深度信息,由此形成三维图像。

笔者在 Matlab 环境下针对红外热波图像的特征,提出了一种新的基于局部极小值的区域分割方法,并与全局阈值法进行比较。文中三维显示的目的仅是将原试件的缺陷以三维的视觉效果展现出来,并不用于精确测量。

1 图像的获取

1.1 实验数据的获取

实验所用标准试件是 200 mm×160 mm 的玻璃钢平底孔试件。在其背面人工钻制了 6 个孔径均为 $\phi 20$ mm,深度不同的平底孔。系统中的热像仪是 FLIR 公司的 Thelma CAM SC3000 热像仪。该热像仪具有 320×240 像素的空间分辨率,使用 14 bit 数字输出接口^[3],可将实时数据直接传输到台式计算机上进行记录和分析。实验时,闪光灯脉冲激励试件表面(孔洞背对闪光灯);热在试件中传导,

收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 国家 863 计划项目“红外热波无损检测技术在复合材料研究中的应用”的资助(2003AA333090)

作者简介: 姜千辉,男,硕士,主要研究方向为多媒体技术,数字图像处理。

遇到与试件热特性有一定差异的区域(孔洞)时温度场分布会出现不均匀性并反映到试件表面,由热像仪记录该不均匀性;经计算机采集获得实验的数据文件记录了不同深度在不同时刻的信号值。

1.2 热波图像的显示

实验获取的数据是 14 bit 的信号值,内含 1 033 幅分辨率为 320×240 的热波图像数据。为减少数据量,从数据文件中每隔 50 幅取一幅热波图像,最后共读取 21 幅图像。要显示这 21 幅图像,需将原始的 14 位信号数据转化为 8 位的灰度图,以方便计算机的显示和处理。具体方法如下:

(1) 依次从数据文档中选取 320×240 个数据元素,存入新矩阵 L_i 中,最后得到 21 个矩阵,即 $i=1, \dots, 21$ 。求出矩阵 L_i 中数据元素的最大值 M 和最小值 m 。

(2) 将当前矩阵 L 中数据元素(即信号值)的最小值 m 映射到灰度值 0,最大值映射到灰度值 255。反映到图像中,即信号值越小,对应的图像灰度值越小,图像越黑;反之,灰度值越大,对应位置的图像越白。如此得到信号值到灰度值的映射关系为:

$$L'(i, j) = \frac{(255 - 0)[L(i, j) - m]}{M - m}$$

其中 $L(i, j)$ 为当前矩阵 L 在 (i, j) 处的信号值, $L'(i, j)$ 为其映射后的灰度值。

(3) 将映射后的 21 个矩阵数据经 Matlab 中的 `mat2gray(')` 函数转换成图像数据,显示图像。显示后的部分热图像如图 1 所示(转置后结果)。六幅图可以动态地反映出缺陷点和正常点不同时刻信号值的不同变化,并能从中判断出缺陷的深度,最亮的圆圈深度最大,最暗的圆圈深度最小。

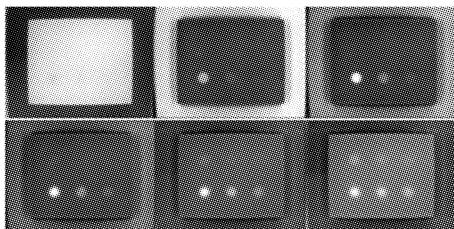
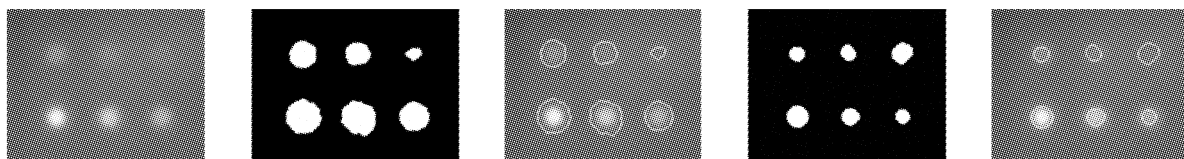


图 1 红外热图序列



(a) 原始图像 (b) 全局阈值分割结果 (c) b 的标记图像 (d) 局部极小值分割结果 (e) d 的标记图像

图 2 两种分割方法的实验结果比较

2 图像目标的提取

2.1 剪切图像

由于试件放在支架上,照射后经计算机处理得到的图像包括试件和支架边缘两部分。因此首先应将支架边缘切除。用 Matlab 图像处理工具中的 `imcrop` 函数可以方便、快捷地实现图像的剪切。图 2 是切割掉边界后的图像,尺寸比例为 4:3(与原图尺寸比例相同),大小为 168×216 。

2.2 图像分割

图像分割是将图像表示为物理上有意义的连通区域的集合^[4],是三维显示前非常关键的一步,直接影响显示的效果。红外热波图像有别于可见光图像,它反映了目标物体的表面温度分布和材料表面特性,必须用一种适合于此的目标信息提取方法。如果用全局阈值法进行分割,由于亮度最低的孔洞与背景灰度差很小,阈值选取过大会过分增大孔洞面积,选取过小会遗漏掉最暗的孔洞,并且深孔洞的边界受缺陷影响,与背景温度亦表现出差异。基于以上的特征,笔者采用了基于局部极小值(即谷点)的区域生长方法,基本思想是寻找图像中的谷点作为种子点由内向外进行生长。为将谷点设定为目标,在处理图像前,首先将图像取反。

2.2.1 极小值搜索算法(方法 1)

预先设定一常数 T 和初始阈值 t ,该阈值在直方图的低谷处,搜索图像中的极小值点,方法如下:

(1) 设图像大小为 (M, N) ,置初值 $i=0, j=0$ 。

(2) 是否满足循环条件: $i < M, j < N$ 。

(3) $I(i, j)$ 在 $[(i-T, j-T), (i+T, j+T)]$ 中最小吗? 若是,则转(4);若不是,转(5)。

(4) 若 $I(i, j) < t$ 且在 $[(i-T, j-T), (i+T, j-1)]$ 中没有标记的极小值点,则 $R_k = I(i, j)$, $i = i+T$,并将其标记为 k ,否则,转(5)。

(5) $i = i+1$,回到(2)。

(6) 若 $i > M$,则 $j = j+1$,回到(2)。

最后得到极小值点序列 $R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_n$ 。

2.2.2 局部极小值的区域生长分割算法(方法 2)

(1) 以标记点为 k 的局部极小值点 $A(i, j)$ 为中心检查它的 8 邻域像素, 如果当前被检查的邻域像素未作标记, 则判断该像素点是否是兼容点, 兼容点定义为:

$$A(x, y) = \{(x, y) \mid d(x, y) \leq \epsilon\}$$

式中 (x, y) —— $A(i, j)$ 的一个 8-邻域;

ϵ ——兼容阈值;

$$d(x, y) = A(x, y) - A(i, j).$$

如该像素满足条件则将其标记为 k , 否则标记为 0。

(2) 以新合并的目标像素为中心, 返回到步骤 (3), 直至到达边界条件, 即不满足兼容条件或已被合并为目标像素。

(3) 以标记点为 $k+1$ 的新的局部极小值点 $B(i, j)$ 为中心, 反复进行 (1), (2) 操作, 直至处理完所有极小值点。

(4) 将所有标记不为 0 的区域内像素的值均设置为 1, 其余像素的值全设置为 0, 最后得到二值图像序列。

该方法中, 阈值 ϵ 的选取尤为重要, 选得过小会过分缩小或漏掉目标; 过大则会过分扩大目标范围。

2.3 二值形态学滤波

利用形态学滤波器(交替进行开、闭运算)可以滤除图像中的高灰度或低灰度的小干扰区域^[5]。开启和闭合两种运算都可以除去比结构元素小的特定图像细节, 同时保证不产生全局的几何失真。开启运算可以把比结构元素小的凸刺滤掉, 切断细长搭接而起到分离作用; 闭合运算可以把比结构元素小的缺口或孔填充上, 搭接短的间断而起到连通作用。开启和闭合均有从图像中提取与其结构元素相匹配形状的能力。

2.4 实验结果

以图 2 为例, 比较两种方法的实验结果。

可以看出, 图 2b 的全局阈值分割效果较差, 要分割出最暗的孔洞, 必然会过分分割其余的孔洞; 而笔者的方法很好地解决了这个问题, 由图 2d 和 e 可以看出, 效果有了明显改观。

2.5 算法误差分析

实验采用的热像仪的分辨能力为 320×240 (长 $\times$ 宽) 像素, 图 1 中每幅图的外框包含的正好是这个范围。仍以图 2 为例, 在物理坐标系中, 测得图像中试件的上边沿像素的纵坐标为 25 像素, 下边沿像素的纵坐标为 210 像素, 所以试件纵向占用的像素为 $208 - 28 = 180$ 个; 试件左边沿像素的纵坐标为 45

像素, 右边沿像素的纵坐标为 274 像素, 所以试件横向占用的像素为 $274 - 45 = 229$ 个。最后得到试件的尺寸为 229×180 像素。通过求得 6 个孔洞的面积来分析误差, 方法是首先求得每个孔洞所包含的像素数, 然后根据公式 $\frac{\text{目标像素数}}{\text{图像像素总数}} \times \text{原始图像尺寸}$, 计算出每个孔洞的面积, 而原始图像尺寸为 $200 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ (精确的面积为 314.159 mm^2), 由此用两种算法求得各孔洞的面积, 以由亮到暗的顺序分别标记序号为 1~6 (表 1)。

表 1 两种分割方法所测得的孔洞面积及相对误差对比

孔洞 序号	方法 1		方法 2	
	孔洞面积	相对误差	孔洞面积	相对误差
1	834.54	1.635 4	354.00	0.126 8
2	826.78	1.631 7	225.91	0.280 9
3	605.53	0.927 5	155.26	0.05 8
4	515.48	0.640 8	180.11	0.426 7
5	406.79	0.294 9	197.96	0.369 9
6	131.20	0.582 4	318.20	0.013 2
平均误差		0.955 6		0.287 2

由表 1 的平均误差可见, 方法 2 比方法 1 在分割精度上有了很大提高。且方法 2 的相对误差起伏小, 较均匀。普通的阈值分割, 为了分割出最暗孔洞而设置的阈值却不适于高亮度的孔洞, 以至无谓增加了高亮孔洞的分割误差。笔者提出的方法很好地解决了这个问题。

3 三维显示

Matlab 是专业而且方便操作的图像软件, 功能非常强大。在 Matlab 环境下对红外热波图像进行三维显示的具体方法如下:

3.1 构造三维体数据

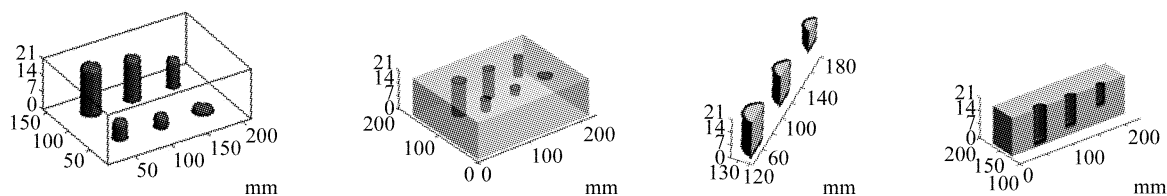
依次读入处理后的 21 幅 168×216 像素的连续断层图像, 并将图像的序列号(反映时序信息)作为第三维数据构造出三维体数据集 D , 得到一个 $168 \times 216 \times 21$ 的三维矩阵。

3.2 体数据集的采样

由于构造出的体数据集数据量大, 占用内存多, 会降低运行效率, 给处理带来一定困难。根据实际情况, 在不影响结果的情况下, 要尽量减少所处理的数据量。函数代码如下:

$$[x, y, z, D] = \text{reducevolume}(D, [4, 4, 1])$$

其中参数 $[4, 4, 1]$ 表示在 x, y, z 轴上对体数据集的抽取比例分别为 4, 4, 1。由此 D 变为 80×80



(a) 试件背面孔洞三维显示图 (b) 试件的三维显示图($\alpha=0.5$) (c) 孔洞剖面图 (d) 试件剖面图

图3 三维效果图

$\times 21$ 的三维矩阵。最后利用 $\text{smooth3}(D)$ 函数对 D 进行数据平滑化处理。

3.3 利用体数据进行三维显示

利用 isosurface 函数计算体数据集 D 在显示平面的累计投影。再利用 patch 函数指定所有顶点的坐标和各小面片的顶点和颜色来创建面片,以图形对象的形式显示出来。

3.4 建立视图,添加 phone 光照模型

phone 模型在每个小面片上进行顶点法向的插值,并计算每个像素的反射。它考虑了实际生活中物体在光源照射下产生特有的光泽^[6],因此生成的图像真实感较强,但是它比较费时。

3.5 设置透明度,实现多层次显示

为等值面设置 α 值(透明系数),添加透明度,揭示试件内部结构。图3是由二维序列图像重建后试件的三维效果图。用 Matlab 进行三维显示,非常方便快捷方便,且易于掌握,可以大大节省开发时间。在显示效果上也不逊于其它工具,虽然它缺乏一定的交互性,但是在算法的实验和分析上非常有效。

4 结论

三维显示效果的好坏直接取决于图像分割的效

果。结合红外热波图像的特点,提出了一种新的基于局部极小值的区域分割方法,其分割效果明显得到改善。它从各个极小值点出发,根据相似度准则寻找兼容像素点,很好地弥补了全局阈值法的缺陷,可以分割出比较准确的结果。由于它是针对红外热波图像的特征提出的方法,所以对其它红外热波图像都适用,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] Stephane Bonnet, Anne Koenic. Dynamic X-ray computed tomography[J]. Proceeding of the IEEE, 2003, 91(10):1574—1588.
- [2] Akira Hirakimoto. Microfocus X-ray computed tomography and it's industrial applications[J]. Analytical Sciences, 2001, 17(Supplement):1123—1125.
- [3] 金万平,张存林. 材料检测和表征的新技术——热波检测及其应用[J]. 新材料产业, 2004, (9):52—55.
- [4] 覃仁超. 一种工业 CT 图像的分割算法[J]. 微计算机信息, 2006, 22(5):221—223.
- [5] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法与应用[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [6] 郭景峰. 数学形态学中结构元素的分析研究[J]. 计算机科学, 2002, 29(7):113—115.

(上接第 96 页)

与传统的频域降噪方法(如傅里叶法)相比,小波降噪实现简单,计算量较小,能够在降噪的同时较好地保留图像的细节,在实际中应用效果较好。

小波降噪技术中的一个难点是阈值的选取,目前提出的一些阈值确定方法都有一些缺陷。在后续研究中,需要针对剪切散斑图像的特点作进一步的研究,以提出最适合剪切散斑图像降噪的阈值选取方法。

参考文献:

- [1] Parker S J, Salter P L. A novel shearography system for aerospace non-destructive testing[P]. Proc Instn

Mech Engrs, 1999, 213.

- [2] Vidakovic B, Lozoya C B. On time-dependent wavelet denoising[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1998, 46(9):2549—2551.
- [3] Daubechies I. The wavelet transform: time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Trans Theory, 2001, 26(9):961—1005.
- [4] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on Information Technology, 1995, 41(3):613.
- [5] 谢杰成,张大力,徐文立. 小波图像降噪综述[J]. 中国图像图形学报, 2002, 7(3):209—217.
- [6] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3):425—455.