

基于多幅 X 射线数字图像的缺陷自动识别技术*

周正干 杜圆媛

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要：在现有的 X 射线数字图像自动识别方法中，多采用对单幅数字图像进行孤立评判的方法。由于此类方法中阈值选取难以最优化，因而存在一定的误判率。为了解决这一问题，提出了一种 X 射线数字图像自动识别新方法。该方法将识别过程分为两步：缺陷提取和缺陷跟踪。第一步利用传统方法在每幅图像中分离出潜在缺陷。这一步保证真缺陷能全部提取出来，而不考虑伪缺陷的数量。第二步力图找出同一试件不同图像中分离出的缺陷之间的相互关系。如果第一步某一图像中分离出的某一缺陷在其他图像中都找不到相对应的缺陷区域，就定义该缺陷为伪缺陷，也就是说，真缺陷在不同图像中必须满足一定的几何关系。多幅图像中的缺陷跟踪综合利用了极线约束、三维重建和三线性约束等立体视觉算法。该方法的检测效果已经利用航空发动机叶片 X 射线数字图像得到验证。试验结果表明：利用该方法可以提高真缺陷的识别率，降低误判率。

关键词：X 射线实时成像 缺陷提取 多视图几何学 图像处理 无损检测

中图分类号：TH 878 TP 391

0 前言

射线检测是常规无损检测的重要方法之一。目前，X 射线数字图像的计算机自动识别是该领域的研究热点。根据工件的 X 射线检测图像自动提取和分离出其缺陷信息，大致有两种方法：针对 X 射线数字图像中存在较大背景起伏的特点，先去除图像背景，再选取合适的阈值分割方法进行缺陷的提取。针对 X 射线数字图像对比度低的特点，先对图像进行增强处理，然后运用其他一些图像处理算法提取并分离出缺陷信息^[1]。

上述图像识别方法均以单幅图像为研究对象，进行图像处理和分析，自动获取被测试件的缺陷。阈值分割在这些识别方法中起着重要的作用，阈值的选取是缺陷得以正确识别的关键。国内外针对阈值选取进行了广泛深入的研究，提出了多种阈值分割方法，但目前仍未得出一种通用方法，也不存在一个评判提取是否成功的客观准则。实际运用中，由于选取的阈值难以达到有效的分割效果，因而存在一定的缺陷误判率。

为了解决这一问题，提出了一种 X 射线数字图像自动识别新方法。运用该方法识别 X 射线数字图像的过程分为缺陷提取和缺陷跟踪两步，即先进行缺陷提取得到潜在缺陷，然后充分利用真缺陷在不同方向 X 射线投影间的相互几何关系，运用立体视

觉算法跟踪得到真缺陷，并去除伪缺陷，从而提高缺陷正确检测率，降低误判率。

1 缺陷提取

利用基于平板探测器的 X 射线实时成像系统，对航空发动机叶片进行预设的旋转和平移，从而获取该叶片的图像序列，如图 1 所示。



图 1 航空发动机叶片图像序列

航空发动机叶片上一般都含有排气孔，加上相对厚重的榫头，使叶片各部分的实体厚度有很大差异，因而叶片图像本身就占据了很宽的灰度范围，而缺陷部分的灰度极有可能在此范围之内，故运用一般的阈值分割方法很难将缺陷部分单独分离出来。

基于上述考虑，采用了先去除图像背景，然后进行阈值分割的缺陷提取方案，其流程图如图 2 所示。

* 国家自然科学基金资助项目(50275008)。20050419 收到初稿，20050930 收到修改稿

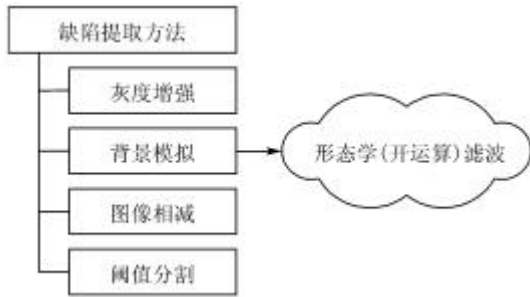


图 2 缺陷提取方案

首先针对缺陷与背景对比度小的特点,采用灰度线性变换扩展灰度分布范围,加大对对比度,然后运用数学形态学滤波进行背景模拟。形态学的基本运算是腐蚀和膨胀,运用形态学开运算的过程如下:先用形态学中的腐蚀去除缺陷;对因此而造成正常部分的畸变,用形态学中的膨胀对处理完的图像进行形态学重建,从而获得背景模板。原始图像减去背景图像得到差值图像,选取适当的阈值分割得到缺陷信息。阈值选取标准是保证真缺陷从背景中全部分割出来,而不用考虑过多的伪缺陷会成为提取目标。

图 3 为缺陷提取的主要过程。经过缺陷提取后得到的真缺陷和伪缺陷统称为潜在缺陷,下一步将通过跟踪到真缺陷,把伪缺陷从潜在缺陷中去除。

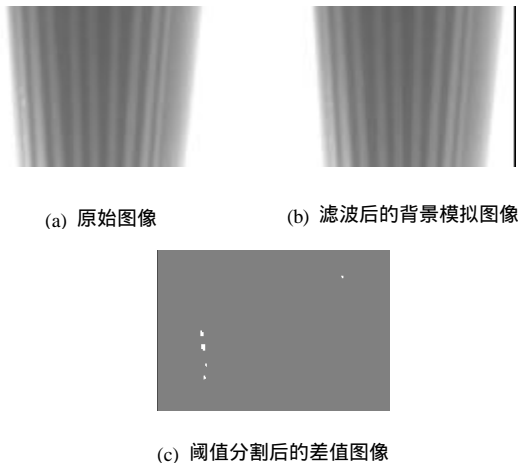


图 3 利用形态学滤波模拟背景的缺陷提取过程

2 缺陷跟踪

图 4 所示为提取潜在缺陷后的叶片多幅图像,图 4 中的白点即为潜在缺陷。缺陷跟踪主要利用立体视觉算法在这些图像中寻求缺陷轨迹,跟踪轨迹上符合约束条件的是真缺陷,而将其余的潜在缺陷作为伪缺陷去除。缺陷跟踪分为缺陷匹配和缺陷跟踪两步。

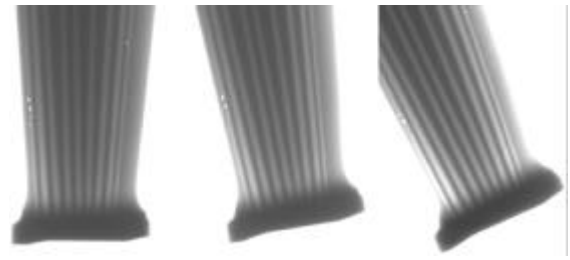


图 4 提取到潜在缺陷的叶片图像序列

2.1 缺陷匹配

进行缺陷匹配时,运用的匹配条件是立体视觉中的极线约束和三维重建算法。按照上述匹配条件对潜在缺陷区域依次进行两两匹配(如图 4 中的图像和图像、图像和图像间进行两两匹配)。如果一幅图像上的潜在缺陷与另一幅图像上的任何潜在缺陷都不匹配,那就将其作为伪缺陷去除。

2.1.1 极线约束

从两个不同视点得到的同一场景的两幅图像之间,存在着极线约束关系,如图 5 所示。 C_1 和 C_2 分别是图像和图像对应的光心, M 是空间一点, M_1 和 M_2 是它在两个图像上的投影点,称 M_1 与 M_2 为对应点。由 C_1 、 C_2 、 M_1 、 M_2 和 M 构成的平面称为极平面,极平面与图像的交线 l_2 称为图像上点 M_1 的极线;同样,极平面与图像的交线 l_1 称为图像上点 M_2 的极线。极线约束准则为:点 M_1 必在对应匹配点 M_2 在图像上形成的极线 l_1 上;同理, M_2 点必在极线 l_2 上。

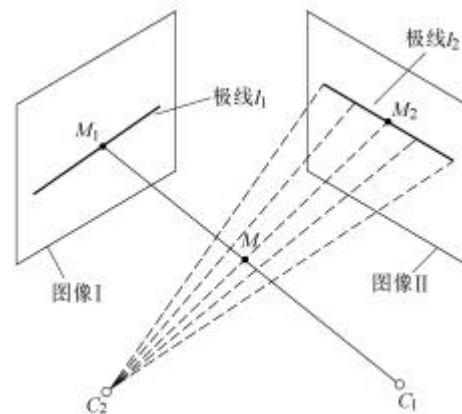


图 5 极线约束模型

对于两幅图像中的匹配点 M_1 和 M_2 ,满足如下的关系式

$$M_2^T F M_1 = 0 \quad (1)$$

式中 F 是一个 3 阶、秩为 2 的基础矩阵,它是匹配点对之间对应关系的数学表示,包含了实时成像系

统的所有内参和外参信息。由于本研究使用的成像系统是未定标的，因此运用 LONGUET-HIGGINS^[2]提出的八点算法来求解 F 。

从上述规则可以看出，多幅图像中的真缺陷在理论上必定满足关系式(1)，但在实际运用中，由于测量误差和噪声的存在，式(1)很难成立。因此，利用式(2)来判断这些图像中待匹配的潜在缺陷是否满足极线约束条件，代入判断式的点坐标对应的是缺陷区域的重心(后面算法中所用的点坐标亦是如此，以后不再赘述)。其中 e 是一极小值。

$$M_2^T F M_1 < e \tag{2}$$

2.1.2 三维重建

对满足极线约束的两两潜在缺陷区域进行其对应空间点的三维重建，判断其对应空间点是否位于叶片空间位置内，如果是真缺陷则其对应的空间点一定位于叶片尺寸范围内。设叶片上某一位置为其空间原点，从而以其为基准测量得到叶片的三维尺寸。

采用基于基础矩阵的三维重建方法计算潜在缺陷所处空间点的三维坐标^[3]。

通过缺陷匹配将部分伪缺陷从潜在缺陷中去除，而满足匹配条件的潜在缺陷暂时当作真缺陷保留下来，试验结果见图6。图6中，圆圈表示的是伪缺陷，细线所连的是相匹配的潜在缺陷。然而，此时被保留的潜在缺陷中仍然含有一定数目的伪缺陷，需要在此基础上进行缺陷跟踪。

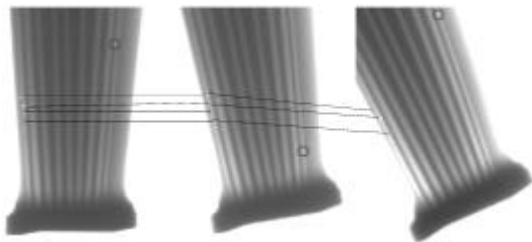


图6 潜在缺陷两两匹配

2.2 缺陷跟踪

缺陷跟踪对象是经过缺陷匹配后获得的潜在缺陷区域，继续利用三线性约束关系^[4]，对这些潜在缺陷进行判断跟踪。

对于空间点 M ，它在图像、图像和图像上的投影点分别为 M_1 、 M_2 及 M_3 ，其空间几何关系如图7所示，其中 C_1 、 C_2 和 C_3 分别是三幅图像对应的光心。它们其中两两除满足极线约束关系外，三个投影点间还满足由 SHASHUA^[4]利用几何不变量理论推出的三线性关系式，如式(3)和式(4)

$$\begin{aligned} &x_2(a_1x+a_2y+a_3)+x_1x_2(a_4x+a_5y+a_6)+ \\ &x_1(a_7x+a_8y+a_9)+a_{10}x+a_{11}y+a_{12}=0 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &y_2(\beta_1x+\beta_2y+\beta_3)+x_1y_2(\beta_4x+\beta_5y+\beta_6)+ \\ &x_1(\beta_7x+\beta_8y+\beta_9)+\beta_{10}x+\beta_{11}y+\beta_{12}=0 \end{aligned} \tag{4}$$

式中 a_i 和 β_i 均为与基础矩阵有关的待定系数， (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x, y) 分别是点 M_1 、 M_2 和 M_3 的投影坐标。由于篇幅有限，在此省略了式(3)和式(4)的推导过程。在 QUAN^[5]的基础上，利用基础矩阵来间接计算得到 a_i 和 β_i 。

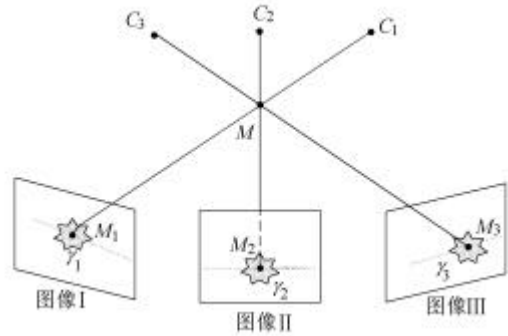


图7 三线性约束模型

利用三线性关系对满足下述前提的潜在缺陷区域 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 进行缺陷跟踪(假设此时图7中的点 M 为叶片空间缺陷区域的重心，而点 M_1 、 M_2 和 M_3 相应设为潜在缺陷 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 的重心)。

- (1) 图像 上的潜在缺陷 γ_1 和图像 上的潜在缺陷 γ_2 满足匹配条件。
- (2) 图像 上的潜在缺陷 γ_2 和图像 上的潜在缺陷 γ_3 满足匹配条件。

将 M_1 和 M_2 的坐标带入式(3)和式(4)，解得潜在缺陷 γ_3 的重心坐标设为 M_3' ，如果 M_3' 满足式(5)，则可以确定跟踪到了真缺陷。

$$\|M_3 - M_3'\| < \epsilon \tag{5}$$

式中 ϵ 是一极小值。

至此，整个缺陷跟踪过程完毕。留在跟踪轨迹上的潜在缺陷为真缺陷，将其余潜在缺陷作为伪缺陷去除，从而达到了去伪存真的目的。试验结果如图8所示。图8中，箭头所指轨迹所含为伪缺陷，其余两条轨迹上所含为真缺陷。

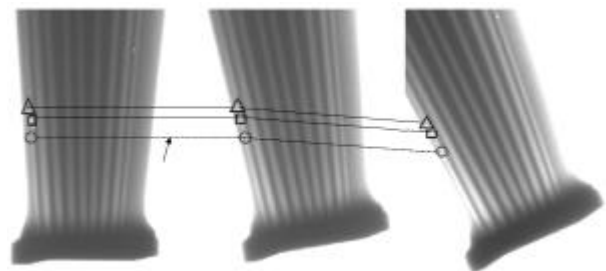


图8 缺陷跟踪

3 结 论

分析了目前 X 射线数字图像自动识别方法存在的不足,提出了基于多幅 X 射线数字图像的图像自动识别新方法,并通过试验验证了传统检测方法和立体视觉算法相结合识别真缺陷的可行性,得出了以下结论。

(1) 利用多幅图像间的几何约束关系,有效跟踪到真缺陷,同时去除了伪缺陷,解决了单幅 X 射线数字图像自动识别方法中难以判断潜在缺陷是否是真缺陷的问题。

(2) 以传统图像识别方法为基础,结合立体视觉算法,将缺陷识别过程分为缺陷分割和缺陷跟踪两步来实现,提高了缺陷的识别率,降低了误判率,同时拓展了计算机视觉在图像处理方面的应用范围。

参 考 文 献

- [1] 刚铁, 王东华. X 射线检测图像中缺陷的自动提取和分割[J]. 焊接, 2001, 5 : 6-10.
- [2] LONGUET-HIGGINS H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. Nature, 1981, 293 : 133-135.
- [3] 邹国辉, 袁保宗. 一种基于对极几何的物体投影重建方法[J]. 铁道学报, 2000, 22(4) : 50-51.
- [4] SHASHUA A. Trilinearity in visual recognition by alignment. In[C]//Eklundh J O, ed. Computer Vision-ECCV'94. Stockholm : Springer-Verlag, 1994 : 479-484.
- [5] QUAN Long. Invariants of six points and projective reconstruction from three uncalibrated images[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 1995, 1 : 34-46.

AUTOMATED DEFECTS RECOGNITION TECHNIQUE BASED ON MULTIPLE RADIOGRAPHIC IMAGES

ZHOU Zhenggan DU Yuanyuan

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Beihang University, Beijing 100083)

Abstract : The current automated recognition of digital radiographic images is mostly carried out in individual images. Certain false detections exist because the threshold values of these methods are difficult to be optimized. To solve this problem, a new automated recognition methodology for digital radiographic images is put forward, which is based on a two-step analysis: Defects extraction and defects tracking. The first step segments potential defects in each radioscopic image using a classic method. In this step the identification of real defects is ensured while the number of false detections is not considered. The second step attempts to find a correspondence between the segmented potential flaws from image to image. The key idea of this work is to consider false detections as those potential defects, which can't be corresponded with any other one in the multiple images. The defects tracking of potential defects in the images follows the principles of multiple view geometry, that is the position of real flaws in the radioscopic images must fulfill some geometric constraints. The inspection throughput of the method has been verified on real radioscopic images recorded from turbine blade. Using this method the real defects can be detected with high probability and the false detections can be eliminated.

Key words : Real-time radiography

Defects extraction

Multiple view geometry

Image processing

Nondestructive testing

作者简介:周正干,男,1967年出生,博士,教授。主要研究方向为信号处理、无损检测以及计算机测控技术等。曾获航天工业总公司科技进步二等奖,发表论文 50 余篇。

E-mail : zzhenggan@buaa.edu.cn

杜圆媛,女,1980年出生,硕士研究生。主要研究方向为 X 射线数字图像处理技术。

E-mail : double6910@sina.com.cn