

低信噪比小检测目标光学薄膜缺陷 图像分割算法研究^{*}

胡广华^{1,2}, 钟球盛¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641; 2. 广州南沙华卓化工有限公司, 广州 511458)

摘 要: 结合测量误差分析理论, 提出一种新的高效的图像分割算法, 将薄膜的连续图像采样过程看做等精度测量过程, 背景图像认为仅存在随机误差, 缺陷像素视做粗大误差。算法在起始阶段通过连续多次采样建立标准背景图像, 并统计各像素位置的灰度标准差, 然后将实时待测图像中的每个像素与标准背景像素进行减法运算, 以 3σ 作为检测判据, 从而将缺陷的检测与分离等效为粗大误差的判别与剔除问题; 同时, 考虑缺陷像素点的空间分布特征, 将上述过程扩展到像素邻域范围, 以二维分割阈值取代一维阈值, 对离散噪声有明显的抑制作用。实验结果表明, 该算法运算速度快, 对低对比度图像适应性好, 对噪声不敏感, 可实现对不同种类缺陷的准确、完整分割, 适于实时光学薄膜检测应用。

关键词: 图像分割; 误差修正; 光学薄膜; 缺陷检测

中图分类号: TP391.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1575-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.105

Low-SNR and small target image segmentation algorithm for defect inspection of optical films

HU Guang-hua^{1,2}, ZHONG Qiu-sheng¹

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangzhou Nansha Huazhuo Chemicals Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: Based on error correction theory, this paper proposed a novel algorithm to inspect defects rapidly. With an assumption that only random errors existed in a background image in which the random errors followed a normal distribution, the defect inspection problem converted to a gross error correcting problem, which could be solved naturally by using the 3σ rule. The algorithm applied 2D thresholds generated from neighbor pixels to reduce the influence of noise. A comparison of the computational results with the existing methods indicates that the proposed algorithm is a viable alternative for image segmentation in defect inspection applications.

Key words: image segmentation; error correction; optical films; defect inspection

在基于机器视觉的光学薄膜缺陷在线自动检测中, 对采集到的原始灰度图像进行分割的目的在于将缺陷区域对应的目标对象像素从背景像素中分离出来, 形成仅包含目标与背景的二值图像。由于分割结果直接影响后续的缺陷查找、定位、分类和标记等检测处理过程, 因此恰当的分割算法成为实现系统快速、准确检测的关键步骤之一。受薄膜材质、光学特性、检测精度和速度要求等因素的影响, 光学薄膜缺陷图像呈现低信噪比特征, 图像整体灰度偏暗, 背景灰度分布不均且时变, 目标对象与背景灰度级差小, 在高速、高精度的检测要求下, 现有的各类图像分割算法无法适应检测的实际需要。为此, 本文结合等精度多次测量误差分析理论, 将缺陷的检测与分离等效为粗大误差的判别与剔除, 并考虑缺陷像素点的空间分布特征, 提出一种新的高效的图像分割算法。

1 光学薄膜缺陷检测特点及现有分割算法分析

目前, 现有的大量图像分割算法一般基于像素灰度的不连续性或相似性, 如基于阈值的分割方法^[1~3]、基于区域生长的分割方法^[4]、基于边缘检测的分割方法^[5]、基于差影运算的分割方法^[6]等。其中, 基于阈值的分割方法由于其简单和实用性应用较广, 但如何确定最佳的分割阈值仍属难题。文献[7]采用由实验确定的固定阈值, 尽管运算简单, 但对图像平均灰度缓变的情况适应性差。其他常用的阈值选择方法包括灰度直方图双峰法^[1,2]、最小误差法^[1,2,8]、Otsu 法^[1,2,9]、最大熵自动阈值法^[1,2,10]等。这些方法均以单幅图像的分析为目的, 并且假定一幅图像总是同时包含目标像素和背景像素。当薄膜缺陷图像仅包含背景像素时, 上述算法效果较差而且极不稳定。当目标像素占据图像平面的较小区域时, 上述方法确定的

收稿日期: 2011-07-26; 修回日期: 2011-09-05 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009ZM0043); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(200805611088)

作者简介: 胡广华(1980-), 男, 江西临川人, 博士, 主要研究方向为机器视觉、微型机电系统(ghhu@scut.edu.cn); 钟球盛(1983-), 男, 广东江门人, 硕士, 主要研究方向为机器视觉。

分割阈值将产生较大的误差,造成分割的不准确。基于区域生长的分割方法需要先选择种子点^[4],不利于缺陷检测的自动化应用。基于边缘检测的分割方法^[5,7]涉及一阶或多阶导数运算,易受噪声的干扰;同时,边界点的判断仍需使用某种先验知识确定的梯度阈值,给算法的使用造成不便。基于差影运算的分割方法^[6]要求预先提供一幅作为参照的标准图像,此图像与待检图像进行减法运算即可得到仅包含缺陷信息的差影图像。该方法运算量小,适于透明材料缺陷在线检测应用,前提是要求背景图像稳定、噪声干扰小。理想条件下,无缺陷的光学薄膜图像灰度分布均匀、一致;而缺陷区域因为成像特性的畸变,形成异于背景灰度的像素点集。此时,采用简单的固定阈值法或差影运算即可实现缺陷的分割。但是,在高检测速度和精度的工况下,线阵 CCD 的采样频率高达数十 kHz。由于曝光时间过短,兼之光源亮度有限,实际的薄膜图像因曝光不足而整体灰度偏暗、目标与背景对比度低。同时,由于薄膜材质的不均匀性、薄膜张力变化引起的振动、光照不均匀且缓慢变化、外部环境变化及成像器件内部噪声等随机因素的干扰,背景区域灰度分布不均匀,平均灰度随光源亮度变化而时变,给图像分割造成困难。

2 算法描述

2.1 算法基本思想

对薄膜的连续图像采样过程可以看做是等精度测量的过程。若灰度采样值中不包含系统误差和粗大误差,则采样值主要受随机误差的影响。对 N 帧连续采样所得背景图像,将第 i 帧图像中像素坐标 (x, y) 处的像素灰度值 $f_{x,y}^i$ 减去其均值 $\bar{f}_{x,y}$, 得到该位置第 i 个灰度残差 $v_{x,y}^i$, 即

$$v_{x,y}^i = f_{x,y}^i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{x,y}^i \quad (1)$$

图 1 是对 160 幅连续采样所得实际背景图像统计某坐标处灰度残差得到的概率分布曲线。显然,该分布符合误差的对称性、单峰性、有界性和抵偿性特征,表明光学薄膜图像背景像素误差基本服从均值为 0 的正态分布 $N(0, \sigma^2)$ ^[11]。因此,可以认为薄膜背景像素灰度变化在概率意义上不会超过极限误差 $\delta_{\text{lim}}(x, y) = \pm 3\sigma_{x,y}$ 。

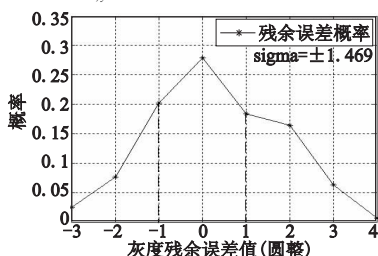


图1 实际的背景图像灰度残差概率分布曲线

当薄膜表面存在缺陷目标区域时,因这些区域的成像特性变化致使其灰度值出现明显异于背景像素的较大变化,目标像素与背景像素的差值一般会超过极限误差。从测量的角度来看,目标像素可以看做背景区域测量值中包含了粗大误差,于是对缺陷目标的检测可以借用 3σ 准则等粗大误差的判别方法^[11]。其过程如下:

a) 根据采集到的 N 帧图像,为图像空间的每个像素位置 (x, y) 计算该点的灰度均值:

$$\bar{f}_{x,y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{x,y}^i \quad (2)$$

b) 运用式(1)及贝塞尔公式计算每个像素位置 (x, y) 的灰度标准差 $\sigma_{x,y}$:

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_{x,y}^i{}^2}{N-1}} \quad (3)$$

c) 对于当前待检测的缺陷图像,扫描每个像素点 (x, y) , 判断其与背景灰度均值的差值是否超过 3 倍的 $\sigma_{x,y}$ 。若是,则该点属于目标,否则属于背景,即分割后的像素灰度 $b(x, y)$ 由下式确定:

$$b(x, y) = \begin{cases} 0 & -3\sigma_{x,y} \leq f_{x,y} - \bar{f}_{x,y} \leq 3\sigma_{x,y} \\ 1 & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 标准图像的生成方法

为了使用式(4)进行目标的判断和分割,需在算法起始阶段建立一幅用于与实时缺陷图像对比的标准图像 $s(x, y)$ 。为此,可以在系统检测的初始阶段连续采样 N 帧图像,然后由式(2)计算各像素点的平均灰度,得到一幅由平均灰度构成的标准图像 $s(x, y)$ 。由于很难确保此系列图像帧不包含缺陷目标,因此,对该系列图像帧应经过粗大误差剔除运算,使其仅包含随机误差。同时,考虑到光学薄膜表面无纹理及线阵 CCD 的行频扫描特点,如图 2 所示,同一帧图像中任一行的采样是相同的,一帧图像只是若干行像素的拼接,因此实际上只需对每列像素(x 坐标相同)统计其平均灰度,即标准图像退化为只有一行。一帧图像通常包含数百行,因此,只需采集一帧图像即可进行标准图像生成运算。

设采集的图像帧大小为 $W \times H$, W 为像宽, H 为像高。为了消除粗大误差对标准图像的干扰,采用以下算法得到标准图像及标准差数据:

a) 为每列像素计算该列灰度均值 $\bar{f}_x$ 和标准差 σ_x ($x = 1, \dots, W$)。

b) 对于图像的每一列,为该列中的每个像素 i 计算灰度残差绝对值 $|v_{x,i}|$; 若其大于 $3\sigma_x$, 则该像素包含粗大误差,应从此列剔除。

c) 重复过程 a) b), 直到每列像素灰度不再包含粗大误差,保存最终算得的灰度均值和标准差作为后续分割的参照。

2.3 标准图像的动态更新

在系统运行的过程中,照明光源的亮度会发生缓慢的衰变,环境的缓变也会引入新的系统误差,造成图像整体灰度的变化。如果不对前面得到的标准图像及标准差进行补偿,可能因误差的累积效应降低缺陷分割的准确性。但是,按照贝塞尔公式实时计算标准差会带来大的时间开销。为此,采用极差法快速估算新的标准差。定义实时图像为 $r(x, y)$, 对图像 $r(x, y)$ 的每一列,动态更新过程如下:

a) 更新灰度均值。对 $r(x, y)$, 排除所有目标像素,计算剩余像素的灰度均值 $\bar{f}_x'$, 以其取代标准图像中保存的原有灰度均值 $\bar{f}_x$ ($x = 1, \dots, W$)。

b) 更新标准差。对 $r(x, y)$, 找出排除了目标像素的最大灰度值 $f_x(\max)$ 及最小灰度值 $f_x(\min)$, 然后用极差法计算新的灰度标准差:

$$\sigma_x' = \frac{f_x(\max) - f_x(\min)}{d_n} \quad (5)$$

其中: d_n 与统计的像素数目有关, 当 $n = 10$ 时, $d_n = 3.08$ ^[11]。

2.4 二维分割阈值

上述分割过程实际上是以 3σ 作为每个(列)像素的分割

阈值,各像素的分割阈值与其他像素位置灰度特征无关,算法对因光照不均匀造成的背景亮度不均有很好的适应性。但由于其仅考虑了像素点的灰度信息,当图像信噪比低、孤立噪声干扰严重时,分割时容易发生误判,即将孤立噪声点当做目标。为了降低算法对噪声的敏感度,将图像的区域信息纳入到考虑范围,将 3σ 准则运用到像素的邻域,形成二维分割阈值,即

a) 对于 $r(x,y)$ 的每个像素,计算其邻域像素灰度平均残差:

$$\bar{v}_{x,y}^s = \frac{1}{12} \sum_k w_k \cdot v_k \quad (6)$$

其中: k 为邻域位置标号,对于8-邻域,其取值为 $[1,8]$; w_k 为图3所示的 3×3 模板定义的 (x,y) 邻域位置 k 处的权值, v_k 为式(1)定义的该位置像素灰度残差;参数12为模板中所有 v_k 的和值。模板中各个邻域位置的权值 v_k 反映了邻域像素与中心像素的距离及影响程度,即四个对角位置远于上、下、左、右四个像素,故权值小,对计算的影响程度也相应更低。

b) 像素点 (x,y) 的残差与其邻域的平均残差构成该点的残差向量 $V_{x,y} = (v_{x,y}, \bar{v}_{x,y}^s)$ 。修改式(4)的分割判据为

$$b(x,y) = \begin{cases} 0 & |v_{x,y}| \leq 3\sigma_x \text{ 或 } |\bar{v}_{x,y}^s| \leq 3\sigma_x^s \\ 1 & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\sigma_x^s = \frac{1}{3}(\sigma_{x-1} + \sigma_x + \sigma_{x+1})$,为图像 x 列邻域均值标准差。这样,只有某像素点的灰度残差及其邻域平均灰度残差均超过了 3σ ,该像素才视做目标,孤立噪声点则被自然滤除。

3 实验分析

为便于比较,选取在线视觉缺陷检测常用的最小误差阈值分割、直接差影分割与本文算法进行对比。所有算法统一采用C++语言在Visual Studio 2008平台上开发实现。测试用计算机CPU为Intel® Core™2 Duo-P8400@2.26 GHz,内存4 GB,操作系统为Windows XP。测试图像来源于OCA(optical clear adhesive)薄膜缺陷样品,包括涂料不均、尘埃、气泡印、白点四种典型缺陷类型,结果如表1所示。

表1 算法测试结果

缺陷类型	原始图像	分割结果		
		最小误差法	直接差影+固定阈值	本文算法
涂料不均				
尘埃				
气泡印				
白点				
无缺陷				

可以看出,对于对比度较低的气泡印和白点缺陷,最小误差法对目标与背景的划分出现了较大误差,原因是此类图像灰度直方图双峰不明显且目标与背景的峰值相差较大,采用全局性单一阈值很难得到准确分割。直接差影算法克服了单一阈值的弊端,但分割结果易受噪声的影响,且很难保证分割的完整性。如对于涂料不均和尘埃图像,该算法只分离出了缺陷的一个局部部分,而对于气泡印这种与背景灰度级差极小的缺陷,背景中的大量噪声点被误判为目标像素。相比较而言,本文算法对所有缺陷种类均表现出了良好的适应性,分割结果最为准确、完整,对噪声的干扰最不敏感。表1也给出了各算法对于图像中

无目标像素情形的测试结果。其中,由于背景像素灰度分布不均,最小误差法无法适应这种情况,出现了较严重的误判。直接差影法的结果取决于固定阈值的选取,当阈值不合适,仍有部分属于噪声的像素被误判为目标像素,如结果图中左边部分(阈值为10)。本文算法对这一特殊情形体现出了较强的适应性,结果清楚表明没有像素被误判为目标。各类算法在时间上的开销差异并不明显,如图4所示。

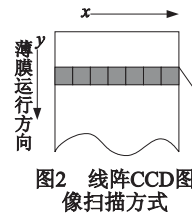


图2 线阵CCD图像扫描方式

1	2	1
2	0	2
1	2	1

图3 3×3模板权值定义

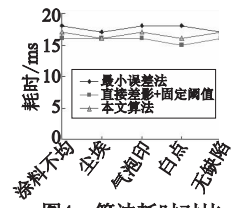


图4 算法耗时对比
(图像尺寸:白点620×405,其余640×480)

4 结束语

光学薄膜缺陷在线检测速度要求高,受薄膜光学特性、缺陷尺寸、类型及成像器件性能影响,所采集到的实时图像容易因曝光不足造成整体灰度偏暗、目标与背景对比度低、噪声干扰严重等问题,导致常规的图像分割算法很难保证分割的准确性和实时性。本文将误差分析理论中的粗大误差判别方法引入到缺陷的检测与图像分割中,算法基于多帧图像的像素灰度统计特性,同时考虑了像素邻域位置的灰度特征,大大提高了目标像素判别的准确性,分割结果完整、可靠,且不易受噪声的影响。由于标准图像的建立仅需在初始化时进行一次;正常检测时,算法仅需遍历图像各像素点进行一次减法运算,故其运行效率高。本文算法适合于存在标准模板图像或材质均匀的缺陷检测应用,如玻璃、LCD、塑料薄膜、纸张等行业的在线视觉质量控制。

参考文献:

- [1] 韩思奇,王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002(6): 91-102.
- [2] 杨晖. 图像分割的阈值法研究[J]. 辽宁大学学报:自然科学版, 2006,33(2):135-137.
- [3] TOBIAS O, SEARA R. Image segmentation by histogram thresholding using fuzzy sets[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2002, 11(12):1457-1465.
- [4] 胡正平,张晔,谭莹. 区域进化自适应高精度区域增长图像分割算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007,29(6):854-857.
- [5] 沈志忠,王硕,曹志强,等. 基于边缘检测的图像分割方法及其在机器鱼中的应用[J]. 机器人, 2006,28(4):361-366.
- [6] 彭向前,陈幼平,谢经明,等. 浮法玻璃缺陷在线检测识别方法研究[J]. 玻璃与搪瓷, 2010,38(1):1-6.
- [7] 梁燕,刘文耀,刘鸣,等. 胶片缺陷在线检测方法的研究[J]. 光子·激光, 2002,13(12):1276-1280.
- [8] GONZALES R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,等译. 2版. 北京:电子工业出版社, 2007:486-493.
- [9] 曾成,赵锡钧,徐欣,等. PCB检测中图像分割技术研究[J]. 传感器与微系统, 2011,30(2):26-28.
- [10] 吴成茂,田小平,谭铁牛. 二维熵阈值法的修改及其快速迭代算法[J]. 模式识别与人工智能, 2010,23(1):127-136.
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:10-51.