

用于光学薄膜缺陷检测的快速图像分割算法*

钟球盛^{1,2}, 李静蓉¹, 胡广华^{1,2*}

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州南沙华卓化工有限公司, 广东 广州 511458)

摘要:为减少光学薄膜缺陷的漏检和误判,提高检测的快速性,提出了一种基于误差修正理论的图像分割算法。该算法接受带有随机误差的背景图像,并以各像素点灰度值残余误差与标准差的偏离程度作为分割依据,最终将缺陷检测转化为粗大误差判别。该算法使每个像素点都具有一个自动更新的最佳分割阈值,可改善全局或局部阈值分割不彻底的缺点。由于在系统初始化阶段标准均值背景图像已构建完毕,正常检测过程中仅需一次减法运算即可完成缺陷的分离;只有当背景图像灰度变化积累到一定程度时,才需要更新标准均值背景图像和标准差,因而算法总体运算量极小。实验结果表明,该算法能有效抑制图像噪声,克服由于目标与背景灰度级差极小而导致的分割困难,实现光学薄膜缺陷的快速检测。

关键词:误差修正;光学薄膜;缺陷检测;图像分割

中图分类号: TP242; TH744

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)10-1170-06

Efficient image segmentation algorithm for defect inspection of optical films

ZHONG Qiu-sheng^{1,2}, LI Jing-rong¹, HU Guang-hua^{1,2}

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. HuaZhuo Chemicals Co. Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: In order to improve the precision of inspection, it's quite significant to provide an appropriate threshold for the segmentation of images with low gray level differences, based on the error correction theory and background subtraction algorithm, a novel image segmentation algorithm was proposed. The algorithm converts defects inspection to gross errors estimation according to the departure degree of residual error from standard deviation, and works well even in the case of considerable inevitable random errors existing in the images. Moreover, since subtraction operation and updating of background image need only to be done once, the algorithm is quite efficient and each pixel will be assigned an independent segmentation threshold automatically. The experimental results indicate that the proposed algorithm can extract the defect region rapidly and completely.

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

0 引 言

在光学薄膜缺陷在线检测中,缺陷尺寸极小,采集到的图像中的缺陷与背景灰度级差极小,难以确定合适的分割阈值。实现光学薄膜缺陷检测,选择合适的图像分割阈值至关重要,若阈值选取过大,缺陷被误判为背景,会导致缺陷漏检;反之,若阈值选取过小,部分背景被错判为缺陷,会导致正常产品误判。目前,对图

像分割算法的研究较多。P. Gamage^[1]等人提出由中值滤波、灰度拉伸、直方图分析确定分割阈值的方法,实现对聚乙烯薄膜的缺陷检测。Jin-Jiang Wang 等人^[2]通过平滑滤波、直方图分析,由双峰法确定分割阈值,对薄膜缺陷图像实现简单而有效的分割。但是,只有当前景与背景有很大灰度级差异且直方图表现出明显的双峰时,双峰法才奏效。A. Khalifa 等人^[3-4]阐述的背景差分算法适用范围比较窄,仅当背景恒定不

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009ZM0043)

作者简介: 钟球盛(1983-),男,广东江门人,主要从事机器视觉方面的研究工作. E-mail: qszchew@163.com

通信联系人: 胡广华,男,博士. E-mail: ghhu@scut.edu.cn

变时,传统背景差分算法才有效,而并不适用于背景图像发生缓慢或激烈变化的场合。曹丹华等人^[5]提出了一种基于图像平均灰度值的阈值分割算法,能够对前景与背景进行有效的分离。Kapur 等人^[6-7]提出了最大熵阈值的分割方法,由于熵涉及到对数的运算,时间开销大,难以满足实时性的要求。N. Otsu 等人^[8-9]研究了最大类间方差的分割方法。

本研究把误差修正理论引入到光学薄膜缺陷的检测领域,与现有的图像分割算法相比较,这种被提出的算法可以克服由于前景与背景灰度级差极小且缺陷几乎淹没在背景当中而导致的图像分割的困难,可实现图像中缺陷区域的快速完整分割,具有较强的实用性,并在同类图像分割方面的应用具备一定的重用性。

1 光学薄膜缺陷特征

光学薄膜的缺陷大致可分为:气泡印、白点、垃圾、气泡、涂料不均、压痕、离型气泡与鼓胶,如图 1 所示。由图 1 可见,各种缺陷与图像背景的灰度级差很小,特别是被命名为气泡印与涂料不均的缺陷灰度级差极小,难以确定一个合适的分割阈值。

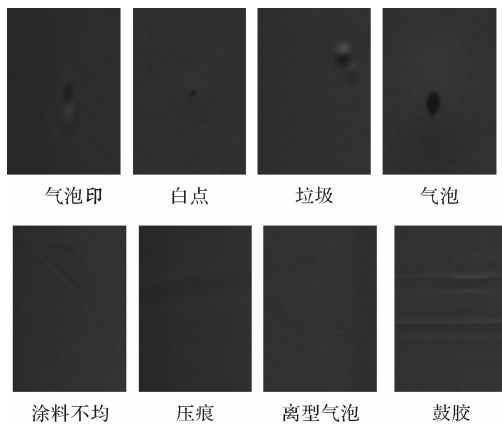


图 1 光学薄膜缺陷示意图

2 图像采集系统误差分析

众所周知,在误差理论中,误差分为 3 类,包括:随机误差、系统误差与粗大误差。

随机误差指的是由于测量过程中的各种因素的随机性影响而产生的误差。在图像采集系统中,这些因素包括:薄膜的无规则振动,电磁噪声的无规则变化,环境信号的无规则变化等等。这些无规则变化的因素正好反映在被采集到的图像上。本研究采用背景图像连续采集的方法来保持图像采集条件的相对稳定不变,使得图像像素灰度值的随机误差分布的离散度小,以保证图像的观察质量高。

系统误差是指在相同测量条件下,对同一被测量进行连续多次测量,误差的大小与符号不变,或者服从一定的函数规律的变化。在图像采集的部分,从薄膜的运动到编码器的信号,从控制器的控制信号到相机的触发,从光源到薄膜,从薄膜到镜头,从镜头到相机的采集,以上每一个环节都有可能由于信号传递或者是机械传动而引入系统误差。例如:光源按一定规律缓慢衰变;机械装置发生缓慢的相对位移;线阵相机内部 CCD 元件的缓慢老化;甚至标准背景图像的选择不当,当前背景与标准背景之间存在的定值差异等等。以上渐变与不变的特定因素构成了复杂的图像像素灰度值的系统误差,对测量的结果产生不良的影响,故需要建立起误差修正模型,将它从测量结果中分离并修正。本研究使用当前背景图像修正“过时”的标准背景图像,实现系统误差的修正。

粗大误差是由于观察操作人员的粗心大意、设备故障或环境突变而造成的误差。由于操作人员不慎,使得相机、光源与薄膜之间的最佳相对位置发生偏移,或是光源发生了激烈的衰减,导致了像素灰度值的剧烈跳变。当薄膜的运动速度超出了设计范围,曝光时间不足,行频信号丢失,会在图像上引起一条显著的黑线,如图 2(a)所示;当薄膜与安装有编码器的辊轴发生相对的滑动,图像被过渡曝光,会在图像上引起一段明显的光亮带,如图 2(b)所示;薄膜在横向受到不均匀的拉伸力,使得薄膜的一端张紧,另一端漂浮,采集到的图像会呈现部分实焦,部分虚焦的现象,如图 2(c)所示,图像的左端存有虚焦现象。薄膜在相机拍照的位置上没有被展平而起皱,采集到的图像被视为存有伪缺陷。当光学薄膜存有缺陷时,图像像素灰度值发生突变,这是无法消除的粗大误差。本研究在保证机械传动平稳、改善机械结构的设计与削弱振动的影响、克服人为与非人为的因素的影响的基础上,把缺陷视为无法避免的粗大误差,基于以上准则实现缺陷与背景的分

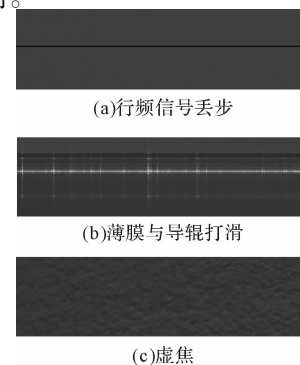


图 2 行频信号丢失、薄膜与导辊打滑与虚焦的图像

3 图像像素数据特征

为了寻找背景图像像素灰度值的特征,需要构建标准的均值背景图像。在连续的图像采集过程中,需要对连续多帧图像相同坐标像素灰度值进行采样。在实验中,连续采集 160 帧背景图像,对坐标(2 000, 500)处的图像像素灰度值进行采样,样本数据如表 1 所示,可求得样本均值为 30.656 2,标准差为 1.336 6, 3σ 置信度区间为[26.646 1, 34.666 3]。

样本的概率分布图如图 3(a)所示,可知,横坐标为像素的灰度值,纵坐标为灰度值出现的概率值,发现样本服从一定的分布规律,图像像素灰度值的分布与单峰分布相对吻合。

残余误差分布图如图 3(b)所示,可知,以 3σ 准则判别样本,第 71 个样本的灰度值为 26,超出了置信度区间,可认为是粗大误差,应将其剔除。剔除粗大误差后的 159 个样本数据如表 2 所示,样本均值为 30.669

8,标准差为 1.306 04, 3σ 置信度区间为[26.78, 34.616 3]。

剔除粗大误差后的样本分布图如图 3(c)所示,可知,发现峰值位置对应横坐标为 31(样本均值经过完整),峰值与均值完全吻合。因此,可认为图像采集系统在总体上无系统误差。

剔除粗大误差后残余误差分布图如图 3(d)所示,可知,采用连续采集标准背景图像的方法,得到同一图像像素坐标下的灰度值分布情况,可见超出置信度区间[-4, +4]的概率为零,符合随机误差的有界性与对称性。如果当前采集到的图像与标准均值背景图像灰度值的残差并没有落在上述置信度区间内,甚至是超出更远,则认为是由缺陷引起的粗大误差,应当把缺陷从图像中分割出来,或者认为是由于渐变和不变因素引起的系统误差,应给予修正。

以上实验结果表明,连续背景图像像素灰度值的分布情况与误差理论相吻合。

表 1 原图像像素灰度值

样本	26	28	29	30	31	32	33	34
频数	1	10	17	39	52	29	10	2
概率	0.006 25	0.062 5	0.106 25	0.243 75	0.325	0.181 25	0.062 5	0.012 5

表 2 剔除粗大误差后的图像像素灰度值

样本	28	29	30	31	32	33	34
频数	10	17	39	52	29	10	2
概率	0.062 893	0.106 918	0.245 293	0.327 044	0.182 39	0.062 893	0.012 579

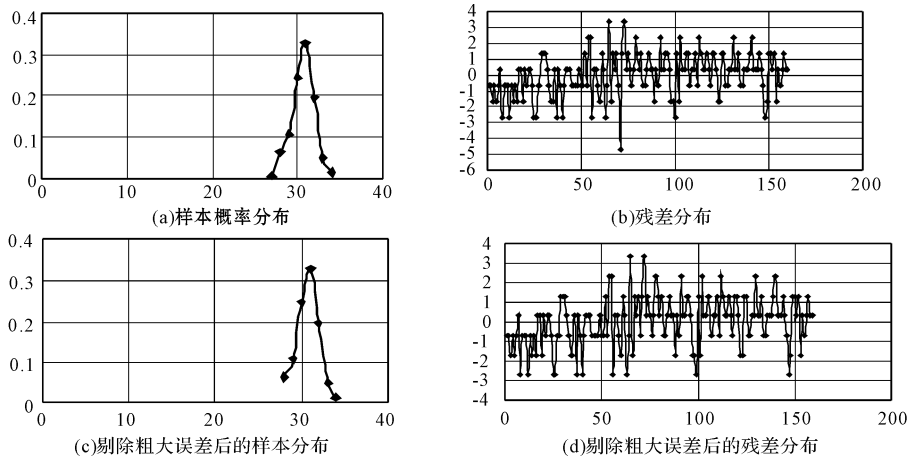


图 3 样本及其残差分布

4 背景像素灰度值分布拟合检验

为了确定背景图像像素灰度值的分布规律,需要进行分布拟合检验(以下计算只是对分布规律的验证,算法本身并不需要)。根据中心极限定理,160 个

样本的分布近似服从正态分布。由偏度与峰度联合检验的理论^[10-12]可知,偏度反映了概率密度函数在均值两边的对称偏斜性,峰度反映了概率密度函数在均值附近的尖锐程度。其中,记样本 K 阶中心矩为 v_k ,记样本偏度的估计值为 r_1 ,记样本峰度的估计值为 r_2 。

则:

$$v_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k \quad (k = 2, 3, 4) \quad (1)$$

$$\hat{r}_1 = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{v_3}{v_2^{\frac{3}{2}}};$$

$$\hat{r}_2 = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right]^2} = \frac{v_4}{v_2^2} \quad (2)$$

若 X 是正态总体, n 很大时, 近似有:

$$\hat{r}_1 \sim N\left(0, \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}\right);$$

$$\hat{r}_2 \sim N\left(\left(3 - \frac{6}{n+1}\right), \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}\right) \quad (3)$$

令:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}; \mu_0 = 3 - \frac{6}{n+1};$$

$$U_1 = \frac{\hat{r}_1}{\sigma_1}; U_2 = \frac{\hat{r}_2 - \mu_0}{\sigma_2}.$$

则有:

$$U_1 \sim N(0, 1); U_2 \sim N(0, 1) \quad (4)$$

偏度与峰度联合检验法的具体实现步骤如下:

- (1) 确立原假设;
- (2) 根据样本计算检验统计量 u_1, u_2 ;
- (3) 在给定显著水平下, 当样本个数 n 很多时,

由:

$$\begin{cases} p\{U_1 \geq u_{\alpha/4}\} = \frac{\alpha}{2} \\ p\{U_2 \geq u_{\alpha/4}\} = \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (5)$$

查正态分布表可确定分位点 $u_{\alpha/4}$, 则 H_0 的拒绝域为:

$$I_c = \{(u_1, u_2) \mid |U_1| \geq u_{\alpha/4} \text{ 或者 } |U_2| > u_{\alpha/4}\} \quad (6)$$

(4) 判别检验统计量 u_1, u_2 , 若 u_1, u_2 没有落在拒绝域 I_c 中, 则接受 H_0 ; 反之, 则拒绝 H_0 .

根据偏度与峰度的理论, 对背景图像像素灰度值的样本数据作正态性检验, 步骤如下:

(1) 假设:

在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 图像像素灰度值总体

X 服从正态分布。

(2) 估计偏度与峰度:

由上述可知样本均值 $\bar{x} = 30.6562$; 样本个数 $n = 160$ 。

由公式(1)可得:

$$v_2 = 1.7755; v_3 = -0.759558; v_4 = 10.601532$$

由公式(2)可得:

$$\text{偏度: } \hat{r}_1 = 0.3210; \text{峰度: } \hat{r}_2 = 3.3626$$

由公式(3)可得:

$$\sigma_1 = 0.190063; \sigma_2 = 0.369643; \mu_0 = 2.96273$$

(3) 确定拒绝域:

对于给定的 $\alpha = 0.05$, 由公式(5)可得:

$$P\{|u_1| \geq u_{\alpha/4}\} = \alpha/2 = 0.025; P\{|u_2| \geq u_{\alpha/4}\} = \alpha/2 = 0.025; u_{\alpha/4} = u_{0.0125} = 2.24, \text{ 由公式(6)可得:}$$

$$I_c = \{(u_1, u_2) \mid |u_1| \geq 2.24 \text{ 或 } |u_2| \geq 2.24\}$$

(4) 判别:

由公式(4)可得:

$$u_1 = -1.68908; u_2 = 1.0820$$

可见, $|u_1| = 1.68908 < 2.24, |u_2| = 1.0820 < 2.24$, 即 (u_1, u_2) 没有落在拒绝域 I_c 上, 故接受原零假设 H_0 , 认为总体 X 服从正态分布。分布拟合检验证实, 连续背景图像像素灰度值服从正态分布。

5 缺陷图像分割算法

本研究对连续 N 帧不含缺陷的标准背景图像的同—坐标位置像素灰度值 $G(x, y)$ 进行 N 次测量, 得到 $G_1(x, y), G_2(x, y), G_3(x, y), \dots, G_N(x, y)$ 的原始灰度值数据, 则灰度均值为:

$$\overline{G(x, y)} = \frac{1}{N}(G_1(x, y) + G_2(x, y) + G_3(x, y) + \dots + G_N(x, y)) \quad (7)$$

每一个原始灰度值与灰度均值作差, 可得对应像数灰度值的残余误差 v_i :

$$v_i(x, y) = G_i(x, y) - \overline{G(x, y)} \quad (1 < i < N) \quad (8)$$

在 N 次测量中, 图像像素灰度值的标准差为:

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i(x, y))^2}{N-1}} \quad (1 < i < N) \quad (9)$$

对于每一个确定的像数坐标的图像像素灰度值, 都有一个确定的灰度均值 $\overline{G(x, y)}$ 与一个确定的标准差 $\sigma(x, y)$, 图像的二值化由下式确定:

$$f(x,y) = \begin{cases} 0 & |G^{\text{Current}}(x,y) - \overline{G(x,y)}| < \eta \cdot \sigma(x,y) \text{ 背景} \\ 255 & |G^{\text{Current}}(x,y) - \overline{G(x,y)}| \geq \eta \cdot \sigma(x,y) \text{ 前景} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $G^{\text{Current}}(x,y)$ —当前采集到的图像像素坐标 (x,y) 处的灰度值， η —置信度区间调整系数， $f(x,y)$ —二值化函数。

对于同一个像素坐标点，当前图像像素的灰度值与标准背景图像灰度均值的差值落在置信度区间时，可认为当前差值是由随机因素引起的残余误差，把当前像素点视为背景处理，像素灰度值置为零；反之，计算得到的差值落在由 η 倍的标准差构成的置信度区间之外，则认为差值是由于光学薄膜缺陷引起的粗大误差，把当前像素灰度值置为 255；当差值判定为粗大误差的情况连续不断重复出现时（实际生产不会出现这样的情况），表明当前背景已经发生了剧烈变化，旧的标准背景图像已经不再适用，所有像素的灰度均值与标准差不再可信，应当重新采集 N 帧不含有缺陷的连续背景图像，重新构建标准均值背景图像，并计算新的灰度均值与标准差，修正由错综复杂因素引起的系统误差。

具体算法步骤如下：

(1) 在无缺陷的光学薄膜当中，连续采集 N 帧标准背景图像；

(2) 计算所有像素点的灰度均值、残余误差与标准差；

(3) 基于粗大误差的判定准则，判断被选取的背景图像像素是否含有粗大误差；

(4) 当发现粗大误差时，剔除含有粗大误差的背景图像，返回步骤(2)重新计算灰度均值、残余误差与标准差；

(5) 对在线产品进行实时检测，如果发现当前的图像像素灰度值与标准均值背景图像对应像素灰度值之差落在 $[-\eta\sigma, +\eta\sigma]$ 的置信度区间中，则判定当前像素是背景图像像素，反之，判定当前像素是缺陷图像像素；

(6) 当图像分割结果发现有连续大面积的缺陷出现时，说明图像采集环境条件发生了剧烈的跳变，旧的标准均值背景图像不再适用，需要进行背景更新，重新构建标准均值背景图像与计算每一个像素点的标准差。依次重复步骤(1)，(2)，(3)与(4)；

(7) 当标准均值背景图像长时间没得到更新时，则需要更新，并计算每一个像素点的标准差。依次重复步骤(1)，(2)，(3)与(4)。

6 实验结果与分析

为了验证本算法，在同一硬件（双核 CPU：2.79 GHz；内存：3 GB）条件下，在 Visual Studio 2008 平台上，使用 C++ 语言编写算法。采用手工固定阈值法、双峰法、平均灰度值法与本研究提出的算法来分别实现图像分割，并对光学薄膜缺陷图像分割的结果进行对比。上述几种图像分割方法的处理结果如图 4 所示。

其中，线阵 CCD 相机采集到大小为 8192×1024 的原始 256 级灰度图如图 4(a) 所示，缺陷（气泡群）与背景的灰度级差极小，几乎淹没在背景中。

手工固定阈值的分割结果如图 4(b) 所示。本研究取分割阈值为 40，可见分割后的图像只能表现缺陷的极小部分，难以实现缺陷区域的完整分割。

首先经过灰度拉伸，然后以双峰法选取最佳阈值分割图像如图 4(c) 所示，由于背景占据图像的绝大部分区域，而缺陷只是占有图像的极小部分区域，原始图像的直方图并不呈现出明显的双峰，从图像分割结果发现该方法失效，表明双峰法不适用于只含有微细缺陷的大幅面图像的分割。

首先由传统的背景差分算法分割图像，然后以差分后图像像素灰度均值的 3 倍最为分割阈值分割图像，得到的结果图像如图 4(d) 所示。从图上表明，噪声的干扰相对比较严重，且缺陷没有得到完整的分割，只能分离出气泡外形轮廓的上半部。

基于误差修正理论，对被提出的算法进行验证，如图 4(e) 所示，其中置信度区间调整系数 η 取 5，在分割后的图像中，发现缺陷（气泡）得到了有效分离，并且噪声（随机误差）得到了有效抑制，优于双峰法和平均灰度值法。被提出的算法能够使得目标主体的区域得到了有效呈现，有利于提高后续缺陷图像特征值提取的准确性，证明了该算法的有效性。并且一旦标准背景图像确定下来，算法仅仅对当前图像经过一次的扫描就可以完成缺陷的分离，计算量少，实时性好，可以满足光学薄膜高速在线检测要求。

4 种算法的耗时对比如表 3 所示，使用 GetTickCount() 作为时间的评价函数（在 Release 版本下），可见该算法的计算时间要小于双峰法与平均灰度法的计算时间，而比固定阈值法的时间性能稍差。

表 3 4 种算法耗时对比

	固定阈值法	灰度拉伸 + 双峰法	背景减影 + 平均灰度法	本研究提出的方法
耗时/s	0.031	0.281	0.125	0.110

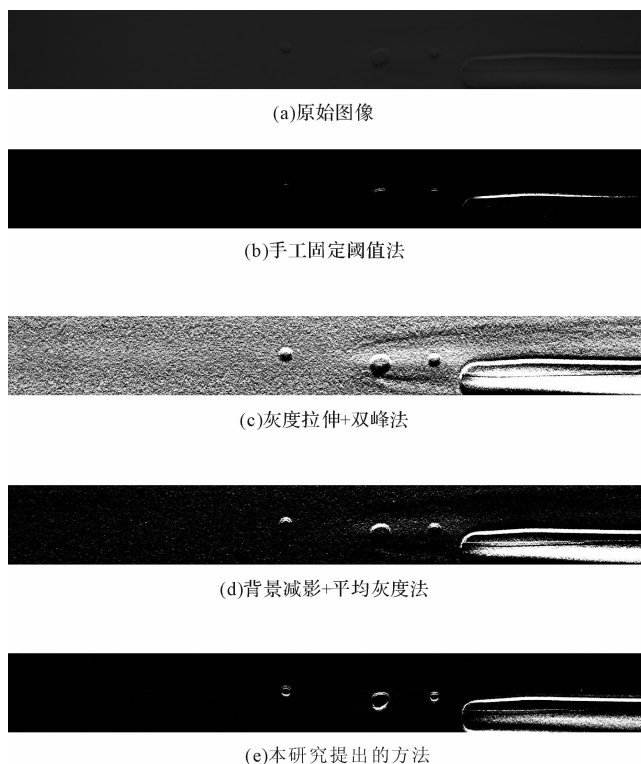


图 4 原始图像、人工固定阈值与其他 3 种方法的实验结果对比

7 结束语

由于光学薄膜缺陷图像整体偏暗,部分缺陷与背景的灰度级差极小,一般的图像分割算法容易造成缺陷图像的分割失效,因此笔者研究的是一种全新的缺陷图像分割算法。该算法采用 C++ 编程语言并在 Visual Studio 2008 平台上开发实现,基于误差修正理论的光学薄膜缺陷图像分割的过程包括:连续采集 N 帧标准背景图像;计算 N 帧标准背景图像每一个像素灰度值的平均值与标准差;计算当前图像像素与标准背景图像像素灰度均值的差值;比较差值与标准差调整系数乘以标准背景图像像素灰度的标准差的结果,以确定分割阈值;当背景发生突变时,更新 N 帧标准背景图像,重新构建标准均值背景图像与计算标准差。该算法克服了全局阈值和局部阈值分割不彻底的缺点,使得每一个像素坐标点都具有一个实时更新的独立的自动更新的分割阈值,分割更为彻底。该算法的另外一个特点在于:克服了传统直方图分析法运算量大且适用性差的缺点,运算量少,实时性好,仅需进行一次减法运算就能完成缺陷图像的完整分割。

实验结果表明:该算法能够有效抑制噪声,克服由

于前景与背景灰度级差极小而导致的分割困难,在同类型图像分割中具备重用性。并与其他几种实时性较好的图像分割算法的实验结果进行对比,证明了被提出的方法取得了良好的分割效果。

虽然对基于误差修正理论的缺陷图像分割算法研究取得了初步的成果,但还是比较初步,例如背景图像数量的选择、计算标准差的原始数据选取、背景图像更新准则的确立、置信度区间范围的选择等存在着优化的空间,接下来本研究将对此进行后续深入研究。

参考文献 (References):

- [1] GAMAGE P, XIE S Q. A real-time vision system for defect inspection in cast extrusion manufacturing process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(1-2):144-156.
- [2] WANG J, LI R, MO X, et al. Web film inspection system [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2009, 120(13):630-635.
- [3] KHALIFA A, SUNDARAJ K, IBRAHIM Z. Complex Background Subtraction For Biometric Identification [C]//International Conference on Intelligent and Advanced Systems. 2007:696-701.
- [4] SCHREIBER D, RAUTER M. GPU-based non-parametric background subtraction for a practical surveillance system [C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops. 2009:870-877.
- [5] 曹丹华, 邹伟, 吴裕斌. 基于背景图像差分的运动人体检测[J]. *光电工程*, 2007, 34(06):107-111.
- [6] MEMONET H N. Network Interface Plugged into a Memory Slot [C]. Proc. of IEEE International Conference on Cluster Computing, 2000.
- [7] 蔡梅艳, 吴庆宪, 姜长生. 采用进化规划和最大熵的目标图像分割算法[J]. *电光与控制*, 2008, 15(4):13-16.
- [8] 肖超云, 朱伟兴. 基于 Otsu 准则及图像熵的阈值分割算法[J]. *计算机工程*, 2007, 33(14):188-189, 209.
- [9] 黄斌. 一种新型指纹图像分割算法[J]. *机电工程*, 2010, 27(7):78-80
- [10] 刘家春. 概率论与数理统计[M]. 2 版. 合肥:合肥工业大学出版社, 2004.
- [11] 郝继平, 徐立群, 李刚, 等. 目标探测精度正态分布偏峰度检验设计及应用[J]. *中北大学学报:自然科学版*, 2009, 30(5):472-476.
- [12] 包中华, 龚沈光, 马珂, 等. 实测海洋环境电场数据正态性检验[J]. *武汉理工大学学报:交通科学与工程版*, 2010, 34(4):776-779. [编辑:罗向阳]