

基于纹理主、旁瓣特征的雪糕棒裂缝缺陷检测*

苑玮琦^{1,2}, 李绍丽^{1,2}, 李德健^{1,2}

(1. 沈阳工业大学视觉检测技术研究所 沈阳 110870; 2. 辽宁省机器视觉重点实验室 沈阳 110870)

摘要:裂缝是雪糕棒表面一种严重缺陷,对雪糕棒的加工和使用影响极大,然而部分又细又浅的裂缝与雪糕棒表面的木纤维纹络具有诸多相似之处,使得当前检测算法提取效果不佳。针对该问题,在对裂缝纹理及木纤维纹络的特征进行详细分析的基础上,提出了一种基于纹理主瓣和旁瓣灰度特征相结合的检测方案。首先建立纹理主瓣和旁瓣灰度特征提取基本模型;然后提取雪糕棒表面头部全部纹理的边缘;接着,根据建立的模型提取上一步骤所得各边缘相应纹理的主瓣和旁瓣灰度特征量,并根据主瓣特征量的数值大小初步锁定其中属于裂缝纹理的候选边缘(其中包括全部的裂缝边缘和部分木纤维纹络边缘);最后,通过旁瓣特征量与预设阈值的数值关系识别出上一步骤候选边缘中的裂缝纹理边缘,从而实现裂缝缺陷的检测。在自建图库 SUT-I3 上进行了测试,结果显示所提方法在裂缝缺陷漏检率为 0 的前提下,其误检率低至 6.07%,相对于其他雪糕棒或木材表面裂缝检测方法其误检率最少降低了 9.29%,表明了所提方法的高效性,具有实际应用价值。

关键词: 纹理主瓣;纹理旁瓣;灰度特征;雪糕棒;裂缝

中图分类号: TP391.41 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Detection of ice cream stick crack defects based on texture mainlobe and sidelobe features

Yuan Weiqi^{1,2}, Li Shaoli^{1,2}, Li Dejian^{1,2}

(1. Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Key Laboratory of Machine Vision, Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

Abstract: The crack is a serious defect on the ice cream stick surface, which affects the processing and usage of the ice cream stick seriously. However, certain thin and light cracks are similar to the wood fiber textures on the ice cream stick surface, which results in the poor extraction performance of present detection algorithms. Aiming at this problem, a detection scheme based on the combination of the mainlobe and sidelobe texture gray features is proposed on the basis of detailed analysis of crack texture characteristic and wood fiber texture characteristic. Firstly, the basic model of the texture mainlobe and sidelobe gray characteristic extraction is built. Secondly, the whole texture edges on the ice cream stick head are extracted. Then, the mainlobe and sidelobe texture gray features of corresponding textures of the edges extracted in the previous step are extracted according to the established model, and the candidate crack edges (containing all the crack edges and certain wood fiber texture edges) are preliminarily determined according to the mainlobe characteristic quantity size. Lastly, the crack texture edges are recognized from the candidate edges derived from the previous step according to the numerical relationship of the sidelobe characteristic quantity and the preset threshold value; and the crack defect detection is achieved. The algorithm was tested on the self-built image database SUT-I2. The results show that the crack defect FAR of this method is as low as 6.07 percent on the premise that the missing detection rate is 0; the missing detection rate is decreased by at least 9.29 percent compared with other ice cream stick or wood fiber surface crack detection algorithms, which indicates that the proposed crack detection scheme is superior and has actual application value.

Keywords: texture mainlobe; texture side lobe; gray feature; ice cream stick; crack

0 引言

雪糕棒^[1]是雪糕等冷饮的柄把,多以桦木为原料,其缺陷会对雪糕自动化生产线或使用者造成不同程度的危害。由于生产工艺不当从而导致雪糕棒受到机器的挤压撕裂进而形成的裂缝是雪糕棒表面一种较为严重的缺陷,容易造成生产线“卡机”、导致使用者的口舌划伤等,是雪糕棒质量检测中的重点筛查对象。而撕裂程度不同的裂缝其具体形态不尽相同,而存在部分裂缝其裂口处闭合紧实,纹理上表现为细且浅的线条,与木纤维极其相似,使得其准确识别具有一定难度。由于人工检测的低效率和低可靠性,关于雪糕棒无损检测的自动化方法研究已经开展起来,主要包括基于光通量^[2-4]的检测法和基于机器视觉的检测方法^[5-6]。其中光通量检测法通过测量激光发射器的光信号在通过雪糕棒某一特定角度或位置前后其光通量的变化情况进而判断相应缺陷的有无,但该方法仅适用于雪糕棒轮廓结构类缺陷(如弓弯、窄料、短料等)的检测;相对而言,机器视觉检测方法的适用范围更广,能够实现雪糕棒外观全部缺陷(包括裂缝)的检测,同时,由于其具有非接触、结构简单、可重复性高和成像方便等优点而逐步成为雪糕棒缺陷自动化检测研究领域的主流方向。

目前基于机器视觉的雪糕棒外观缺陷检测的研究主要可分为两个方面,分别为硬件系统研究和软件算法方案设计。硬件系统主要包括吴志仁等人^[7-8]研制的雪糕棒“视觉拣选机”以及成丽佳^[9]的“雪糕棒质量视觉在线检测系统”,其两者基本工作机理类似,均能良好的实现目标传送、图像采集、分类处理等功能。而目前雪糕棒检测算法的研究均基于上述硬件系统成像环境所得图像,经文献检索,目前针对雪糕棒裂缝缺陷检测算法的研究并不多^[10-12],主要可总结为如下3类:1)轮廓投影法,其基本原理为首先获得雪糕棒的轮廓曲线,然后对于其两端圆头区域进行沿着雪糕棒短轴方向的投影,并通过获得的投影值大小判断裂缝的有无,但该方法仅适用于裂口宽且深的严重裂缝的检测^[10];2)局部阈值分割法,该方法首先获取原图像与一定参数下的均值滤波图像各像素点间的灰度差异,然后将差异大于所设定阈值的位置判定为缺陷区域,但该方法的检测效果取决于所设定阈值的数值大小,过低的阈值会导致大量噪声,而过高的阈值会使得对比度较小的缺陷分割不出^[11-12];3)灰度直方图法,该方法首先对雪糕棒表面区域进行灰度直方图统计,然后将其波谷值作为阈值对图像进行分割,将得到的各子区域灰度均值与雪糕棒表面正常区域进行对比,将其差值大于某一设定阈值的区域判断为缺陷,而由于裂缝本身所占雪糕棒表面面积的比例很小,且较浅的裂缝与正常

雪糕棒表面灰度接近,使其在直方图上并不能单独的表现为一个“峰”,而是与正常雪糕棒表面所形成的“峰”融合在一起,因此对于此类较浅裂缝其检测效果不佳^[11]。

由于雪糕棒裂缝缺陷检测属于木材缺陷检测的范畴,因此对木材表面裂缝缺陷检测相关研究同样进行了文献检索,结果发现其研究亦不多,主要包括朱蕾^[13]提出的基于小波变换和形态学相融合的边缘检测方法,用以提取裂缝边缘;Shanhnorbanun S 等人^[14]提出的基于学习矢量量化(learning vector quantization, LVQ)神经网络的裂缝识别方法;Zhang Y. ZH. 等人^[15]提出的基于数据字典的裂缝检测方法;但上述研究主要针对裂口不闭合的严重裂缝缺陷,并没有对裂口处闭合紧实的轻微裂纹加以考虑。Qtsu N^[16]和吴东洋等人^[17-18]先后提出(或使用)OTSU法、灰度共生矩阵结合聚类算法、颜色矩结合聚类算法对裂缝或条状纹理进行检测,其主要利用了裂缝纹理在灰度、纹理及颜色方面与木材正常表面的差异性,而对于闭合紧实裂纹,其灰度大小、纹理状态及颜色特征均与木材表面纤维的分布极其相似,因此其方法并不适用于该类裂缝的提取。

综上所述,目前的研究对于雪糕棒表面(乃至木材表面)闭合紧实的细小裂缝检测效果不佳,因此针对该问题,本文提出了一种基于纹理主瓣和旁瓣灰度特征相结合的检测方案。该方案首先利用纹理的主瓣灰度特征识别候选裂缝纹理的边缘区域,进而通过纹理的旁瓣灰度特征进一步将属于裂缝纹理的边缘精确提取出来,从而实现雪糕棒表面细小裂缝缺陷的检测。

1 雪糕棒表面裂缝及木纤维纹理特征分析

裂缝是雪糕棒表面的一种缺陷,其呈线状、长短不一、沿木纤维方向延展,且总是始于雪糕棒头部边缘,图1所示为裂缝纹理与雪糕棒轮廓位置关系示意图,其中虚线表示雪糕棒轮廓,其内部的黑色曲线表示裂缝,黑色实线矩形框内为雪糕棒轮廓的圆头区域。



图1 雪糕棒与裂缝位置关系示意图

Fig. 1 Ubiety relationship schematic diagram of ice cream stick and crack

雪糕棒表面裂缝主要可分为如下3类,分别为非闭合型劈裂、闭合型暗裂缝和闭合型亮裂缝,其中的“闭合”指视觉上无法看到裂缝缺陷裂口内壁;图2(a)所示白色箭头所标注的为非闭合裂缝,该类缺陷较为严重,视

觉上也更明显,其检测相对容易;闭合裂缝其裂痕处闭合紧实,仅在开裂处留下或暗或亮的线状痕迹,是本文的主要研究对象,如图 2(b)~(d)中白色箭头所指,可见同样为闭合紧实的裂缝但其灰度及与周围邻域的对比度并不一致,如图 2(d)裂缝较为严重,而图 2(b)、(c)在视觉上并不明显,但利用其呈线状这一特征进行检测仍是一种可行的思路。但是与其相似的是部分雪糕棒表面的木纤维纹络,如图 2(d)黑色箭头所指,其呈线状、同样表现为或明或暗的条纹,且其长短不定,与图 2(b)、(c)的裂缝十分相似,因此如何将其分辨开是至关重要的问题。

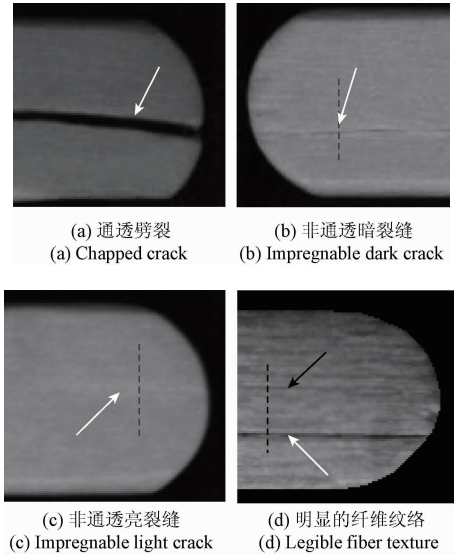


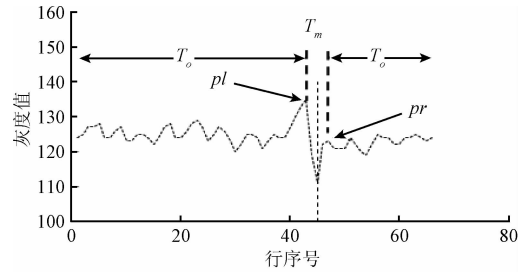
图 2 雪糕棒表面裂缝及木纤维纹理图例
Fig. 2 Legends of the crack and wood fiber texture on ice cream stick surface

图 3(a)所示为图 2(b)黑色虚线列灰度分布曲线,其中行序号 45 处为图 2(b)白色箭头所指的裂缝与黑色虚线相交的位置,称为关键位置;从关键位置开始分别向曲线两侧搜索局部极值,则其两侧所遇见的首个极值位置 pl 、 pr 所夹区域称为该条曲线的主瓣区域 T_m ,关键位置称为主瓣中心位置;则曲线上除 T_m 外的区域称为旁瓣区域 T_s ,如图 3(a)所示,可见,主瓣区域内曲线的波动幅度明显大于旁瓣区域的波动幅度,因此考虑可通过提取具有较大波动幅度值的区域从而进行裂缝纹理的检测。

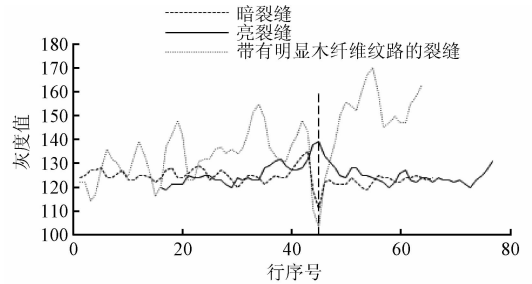
图 3(b)所示为图 2(b)~(d)中黑色虚线列灰度分布曲线以其相应的关键位置对齐(即行序号 43 处)后的状态。可见,3 条曲线均满足上述描述,但可观察到图 2(d)曲线旁瓣区域的波动幅度已大于图 2(b)、(c)曲线主瓣波动幅度,也即其木纤维纹络引起的灰度变化大于等于部分裂缝纹理导致的灰度变化,因此仅通过波动幅

度值的大小无法将该情况下的木纤维有效剔除。

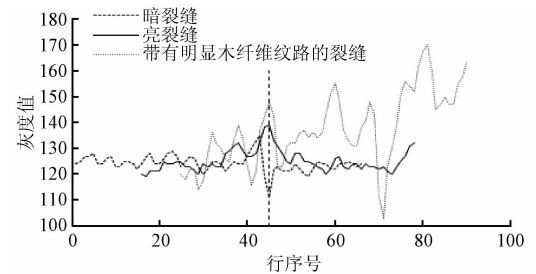
图 3(c)所示为将图 2(d)黑色箭头所指木纤维纹理和黑色虚线相交处与图 2(b)、(c)关键位置对齐的状态,可见,此时当木纤维位置作为主瓣区域时与其相应旁瓣区域的曲线波动幅度差异很小,因此可根据该特征进一步将木纤维纹络剔除。



(a) 裂缝纹理一横剖面主、旁瓣区域灰度分布状态分析
(a) The gray scale distribution analysis of crack texture mainlobe and sidelobe regions on a transverse section



(b) 不同雪糕棒裂缝纹理一横剖面主瓣中心位置对齐后灰度分布状态
(b) The gray scale distribution curves of diverse ice cream stick crack textures after the alignment at the mainlobe center on a transverse section



(c) 木纤维纹理与裂缝纹理某一横剖面主瓣中心位置
(c) The gray scale distribution curve of wood fiber texture and crack texture after the alignment at the mainlobe center on a transverse section

图 3 裂缝和木纤维纹理灰度分布曲线

Fig. 3 The gray scale distribution curves of crack and wood fiber texture

由以上分析可知,裂缝和木纤维纹理在几何形态、空间位置和灰度分布上均具有极大的相似性,但裂缝纹理主瓣区域内灰度波动较大,且相对木纤维纹络而言,其与旁瓣区域灰度波动值的差异性也更大,因此考虑可将其作为特征提取出来用于裂缝纹理检测。

2 模型与理论

2.1 纹理主瓣灰度特征提取模型

如图4所示,对于某一线状纹理区域 T_{line} (阴影区域),建立一个以其最小外接矩形 (smallest surrounding rectangle, SSR) 几何中心为原点 $O(0,0)$ 的平面直角坐标系 xOy ,并分别按照其 SSR 的长、短轴方向确定坐标系的 x, y 轴方向。则在该坐标系下,纹理 T_{line} 区域内具有最大 x 坐标的点 $P_{\text{max}}(x_{\text{max}}, \max[f(x_{\text{max}})])$ 与具有最小 x 坐标的点 $P_{\text{min}}(x_{\text{min}}, \max[f(x_{\text{min}})])$ 将 T_{line} 区域的轮廓线划分为两部分,分别记为 C_u 和 C_d ,且满足式(1)。

$$\sum_{x \in C_u} f(x) \geq \sum_{x \in C_d} f(x) \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 表示 T_{line} 轮廓线的坐标 x 所对应的 y 坐标值。则称曲线 C_u 为纹理 T_{line} 的上边缘, C_d 为 T_{line} 的下边缘,如图4所示。

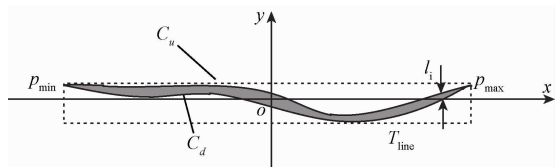


图4 线状纹理及其坐标系

Fig.4 Wirelike texture and its coordinate system

如图4所示,纹理 T_{line} 上边界 C_u 为一条由 n 个点 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 构成的连续曲线(其中, p_1 (即 p_{min})、 p_n (即 p_{max}) 分别表示其左、右端点),则点 p_i 与 p_{i+1} 在 x, y 轴方向距离分别为 $d_x = p_i(x) - p_{i+1}(x) - 1 = 0$ 和 $d_y = p_i(y) - p_{i+1}(y) - 1 = h_i$,其中 $p_i(x)$ 表示点 p_i 在 x 轴上的坐标, $p_i(y)$ 表示点 p_i 在 y 轴上的坐标, h_i 的取值范围为 $-1, 0, 1$ 。

以曲线 C_u 为基准,定义一个可变形态和尺寸的组合窗口 W_u ,组合窗口由 n 个大小和方向相同的子窗口 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 按一定规则排列组成,其中子窗口 w_i 是一个长轴沿着 xoy 坐标系 y 轴方向、长为 L 、宽为 α ($\alpha = 1$) 的矩形(或称为线段),其上、下端点分别为 u_i, d_i 。首先使矩形 w_1 与曲线 C_u 的左端点 p_1 在 x 轴方向对齐,然后将其余的 $n-1$ 个矩形依次沿 x 轴并排排列,即依次使 w_{i+1} 与 w_i 在 x 轴方向距离为 0 ;接着,调整 w_i 在 y 方向的位置,使其下端点 d_i 与点 p_i 距离为 0 ,最终形成的子窗口摆放方式即为组合窗口 W_u 的形态。其中 L 表示 T_{line} 在 y 轴方向的平均宽度,其计算方法如式(2)所示。

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (2)$$

式中: l_i 表示点 p_i 所在列所对应的纹理 T_{line} 的高度,如图

4所标注。

在 x 轴方向,子窗口总宽度 L_w 与纹理 T_{line} 的尺寸满足式(3)的关系;在 y 轴方向,子窗口总高度 H 与 T_{line} 的尺寸满足式(4)的关系。

$$L_w = \sum_{i=1}^n \alpha_i = n \quad (3)$$

$$H = \max_{i=1,2,\dots,n} u_i(y) - \min_{i=1,2,\dots,n} d_i(y) \quad (4)$$

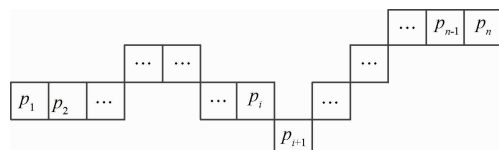
式中: α 表示子窗口的宽度, i 表示子窗口的序号,则 α_i 表示第 i 个子窗口的宽度;式(4)中, $u_i(y), d_i(y)$ 分别表示子窗口 w_i 上、下端点在所建立 xoy 坐标系下的 y 轴坐标。

对于区域 T_{line} 的下边界 C_d ,同样以其为基准建立组合窗口 W_d ,则与 W_u 不同的是在调整 w_i 在 y 方向的位置时将规则改变为:调整 w_i 上端点 u_i 与点 p_i 的距离为 0 。

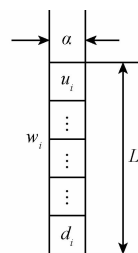
图5所示为某一曲线分别作为纹理上边界和下边界时其相应的组合窗口形成过程及窗口最终形态(其中每个小正方形表示一个点)。

则组合窗口 W_u (W_d) 所覆盖区域即为以纹理 T_{line} 的边缘 C_u (C_d) 上各点为关键位置的 y 方向灰度分布曲线主瓣区域的并集,称为纹理 T_{line} 的主瓣区域,则据此定义纹理 T_{line} 的主瓣灰度特征量 G_{main} 如式(5)所示。

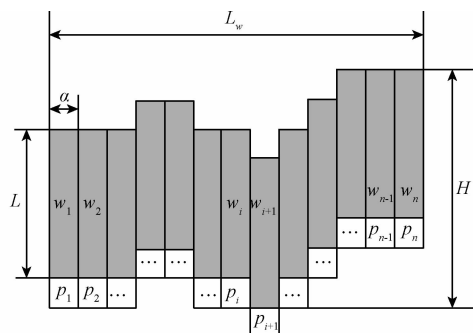
$$G_{\text{main}} = \max \{ F(w_d, -1), F(w_u, 1) \} \quad (5)$$



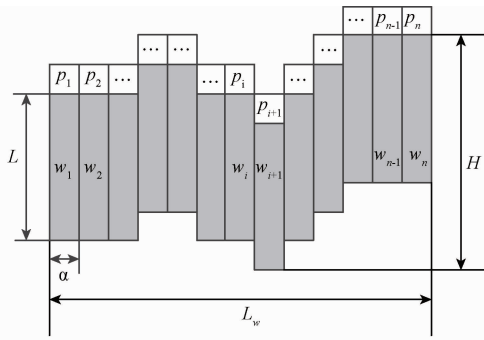
(a) 某一曲线
(a) A certain curve



(b) 子窗口形态
(b) The form of child window



(c) 组合窗口 W_u 形态及与 C_u (图(a)曲线作为纹理上边缘) 位置关系
(c) The form of combined window W_u and its ubiety relationship with C_u (the curve in Fig.(a) is regarded as the texture upper edge)



(d) 组合窗口 W_d 形态及其与 C_d (图(a)曲线作为纹理下边缘) 位置关系
(d) The form of combined window W_d and its ubiety relationship with C_d (the curve in Fig.(a) is regarded as the texture lower edge)

图 5 组合窗口生成过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of combined window constructing process

式(5)中: w_d, w_u 分别表示目标曲线作为上、下边缘时所建立的组合窗口在图像中位置坐标的集合, $\Gamma(*, *)$ 的定义如式(6)所示。

$$\Gamma(r, \xi) = \frac{1}{L_w} \sum_{i=1}^{L_w} \frac{1}{L} \text{abs} \left[\sum_{i=1}^L g(p(i), f(p(i)) - (\xi) \times t) - \sum_{(x,y) \in r(i)} g(x, y) \right] \quad (6)$$

式中: i 表示构成曲线 $C_u(C_d)$ 的点序列的序号, $p(i)$ 表示其中第 i 个点的 x 坐标; $f(a)$ 表示曲线 $C_u(C_d)$ 上 x 坐标为 a 时相应的 y 坐标值; ξ 的取值范围为 $[-1, 1]$, $\xi = -1$ 时表示当前曲线作为上边缘, $\xi = 1$ 表示当前曲线作为下边缘; r 表示坐标集合, 其取值范围为 $[w_d, w_u]$, $r(i)$ 表示集合中横坐标为 i 的点所构成的子集。

2.2 纹理旁瓣灰度特征提取模型

将 2.1 节纹理 T_{line} 和窗口 W_u, W_d 所组成的区域称为 R_{main} , 则在坐标系 xoy 下, R_{main} 在 x 轴方向的长度 $L_{Rm} = L_w$, 在 y 轴方向的高度 H_{Rm} 满足式(7)。

$$H_{Rm} = 2 \times H + L \quad (7)$$

则建立两个与 R_{main} 几何形态与尺寸均相同的窗口 $R_{\text{one}}, R_{\text{other}}$, 并调整 $R_{\text{one}}, R_{\text{other}}$ 使其左右两端与 R_{main} 对齐, 即使得其 x 坐标位置相同; 然后调整 $R_{\text{one}}, R_{\text{other}}$ 在 y 轴方向的位置, 使得 R_{one} 下边缘与 R_{main} 上边缘重合, R_{other} 与 R_{main} 下边缘重合, 则最终的 $R_{\text{one}}, R_{\text{other}}$ 位置所覆盖区域为以 $C_u(C_d)$ 上各点为关键位置的 y 方向灰度分布曲线的部分旁瓣区域的并集, 则据此定义纹理 T_{line} 的旁瓣灰度分布特征量 G_{vice} 如式(8)所示。

$$G_{\text{vice}} = \text{abs} \left[\Phi(R_{\text{main}}) - \frac{\Phi(R_{\text{one}}) + \Phi(R_{\text{other}})}{2} \right] \quad (8)$$

式中: $\Phi(R)$ 的定义如式(9)所示。

$$\Phi(R) = \sum_{(i,j) \in R} \left\{ g(i, j) - \frac{1}{A(R)} \sum_{(x,y) \in R} g(x, y) \right\}^2 \quad (9)$$

式中: R 为区域变量, 其取值范围为 $\{R_{\text{main}}, R_{\text{one}}, R_{\text{other}}\}$; $(i, j), (x, y)$ 表示区域 R 内的坐标位置, $g(*, *)$ 表示点 $(*, *)$ 处的灰度值; 其中 $A(R)$ 表示区域 R 的面积。

3 基于纹理主瓣和旁瓣灰度特征检测雪糕棒表面裂缝

本文裂缝纹理检测方法主要可分为雪糕棒头部纹理边缘提取、基于主瓣灰度特征提取裂缝纹理候选边缘以及基于旁瓣灰度特征的裂缝纹理边缘精确识别 3 个大步骤, 具体流程如图 6 所示。以下小节详述了各步骤具体实现方法。

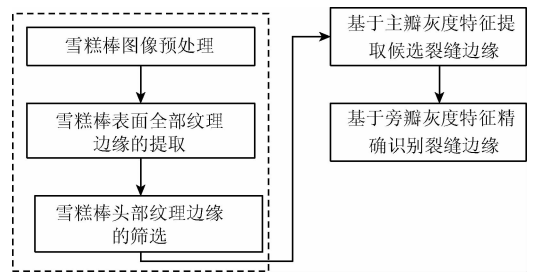


图 6 雪糕棒表面裂缝纹理检测流程

Fig. 6 Detection flow chart of ice cream stick surface crack

3.1 雪糕棒头部纹理边缘提取

首先根据先验知识粗定位待检测的雪糕棒区域, 进而通过 OTSU 算法^[16]将其从背景中精确的分割出来, 作为本文的感兴趣区域(region of interest, ROI); 然后, 使用一定参数下的 canny 算子^[19]对 ROI 区域进行边缘检测, 其参数设置的基本条件为保证本文图库中图像上裂缝纹理的边缘均被提取出来(其上、下边缘至少提取其一), 其具体数值的大小需通过实验获得; 接着, 使用并查集^[20]算法对所得边界进行连通区域标记, 得到 n 个互相独立的子区域 E_i, i 表示连通区域编号, 其取值范围为 $1, 2, \dots, n$; 继而, 根据第 1 节特征分析中裂缝总是起始于雪糕棒圆头区域边缘的特点制定式(10)的条件对上述所得的边缘区域 E_i 进行筛选, 筛选所得区域集合称为 E_{head} 。

$$\Psi(E_i, R_{\text{circle}}) \geq T_{\text{dis}} \quad (10)$$

式中: R_{circle} 表示雪糕棒圆头边缘区域; T_{dis} 为距离阈值, 具体通过观察统计获得; $\Psi(a, b)$ 的计算如式(11)所示。

$$\Psi(a, b) = \min_{\substack{(i,j) \in a \\ (m,n) \in b}} [g(i, j) - g(m, n)] \quad (11)$$

式中: a, b 表示两个不同的区域。

3.2 基于主瓣灰度特征提取裂缝纹理候选边缘

针对上一步骤提取出的各边缘曲线 E_{head} , 首先根据其

SSR 确定坐标系 xOy , 然后按照 2.1 节方法建立组合窗口, 进而根据式(5)计算各边缘曲线的主瓣灰度特征 G_{main} 。然后根据式(12)的方法初步提取裂缝候选边缘(即可能包括裂缝和木纤维纹络), 则将其构成的集合称为 E_{cand} 。

$$E_{\text{head}}(j) \in \begin{cases} \text{可能是裂缝,} & G_{\text{main}} \geq t \\ \text{非裂缝,} & G_{\text{main}} < t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E_{\text{head}}(j)$ 表示边缘区域集合 E_{head} 中的第 j 个元素; t 为阈值, 其大小通过实验获得。

3.3 基于旁瓣灰度特征的裂缝纹理边缘精确识别

根据 2.2 节方法获得 3.2 节所得各候选边缘 E_{cand} 的旁瓣灰度特征量 G_{vice} , 并通过式(13)的方法识别其中属于裂缝纹理的边缘, 从而实现裂缝缺陷的检测。

$$E_{\text{cand}}(k) \in \begin{cases} \text{裂缝,} & G_{\text{vice}} \geq \gamma \\ \text{木纤维,} & G_{\text{vice}} < \gamma \end{cases} \quad (13)$$

式中: $E_{\text{cand}}(k)$ 表示候选边缘集合 E_{cand} 中的第 k 个元素; γ 为阈值, 其大小通过实验获得。

4 算法评价指标及测试环境

为了评价算法性能, 定义了如下的评价指标;

$$FAR = \frac{NFA}{NIA} \times 100\% \quad (14)$$

$$FRR = \frac{NFR}{NLA} \times 100\% \quad (15)$$

FAR(false accept rate) 表示算法认假率, 即非裂缝纹理边缘被误检为裂缝边缘的比率, 其中, NFA(number of false accepts) 为错误接受非法成员的次数, NIA(number of illegal member attempts) 为非法成员尝试次数。FRR(false rejection rate) 表示拒真率, 即真正的裂缝边缘被误识别为非裂缝边缘的比率, 其中, NFR(number of false rejections) 表示错误拒绝合法成员的次数, NLA(number of legal member attempts) 表示合法成员尝试的次数。

测试本文算法实验的软件平台为 Visual Studio C++ 2010, 所使用的计算机处理器型号为 Intel i5-6600, 4 核, 主频为 3.30 GHz, 内存为 8 G, 操作系统为 Windows 7 64 位专业版 Service Pack 1。

5 实验结果与分析

5.1 实验数据库的建立

本文自行建立了一个 114 型雪糕棒图像数据库用于算法验证。图库中图像的采集均基于真实生产现场环境, 图像采集的主要装置包括 XIME 公司 USB 口面阵相机和 OPT 公司高亮条形白光光源, 将其安装在雪糕棒生产流水线上, 通过雪糕棒传送链条与激光开关的位置

变换而触发相机、采集图像。其中图像大小为 1280×512 , 图像库命名为 SUT-I3。本文共对人工挑选出的含有闭合型裂缝缺陷的 422 支雪糕棒进行了成像, 即生成的图库大小为 422。图 7 所示为系统实物, 其采集的图例如图 8 所示。

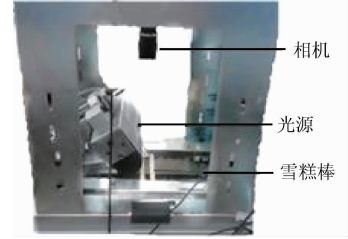


图 7 图像采集装置

Fig. 7 Image acquisition device

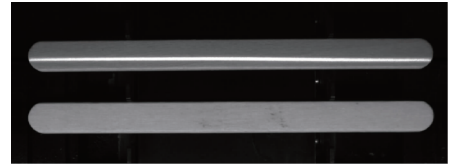


图 8 图库中的图例

Fig. 8 Legends in the image database

图 8 中共两支雪糕棒, 其中下方的雪糕棒为本文将要处理的目标雪糕棒, 上方雪糕棒用于其他指标的检测, 不是本文的研究内容。

5.2 算法关键参数的确定

5.2.1 阈值 t 的确定

为了将真实的裂缝边缘全部被包含在候选边缘集合内而不遗漏, 则经 3.2 节算法处理后, 其 FRR 必须为 0。图 9 所示为不同 t 值下算法 FRR 的分布曲线, 可见当 $t \leq 8$ 时 FRR 为 0.00, $t > 8$ 时 FRR 从 0.00 逐渐增加, 而根据 3.2 节算法原理, t 值越小, 提取出的裂缝和噪声边缘越多, 则当 $t = 8$ 时满足在不漏掉真实裂缝的同时噪声最少, 因此最终确定 $t = 8$ 。

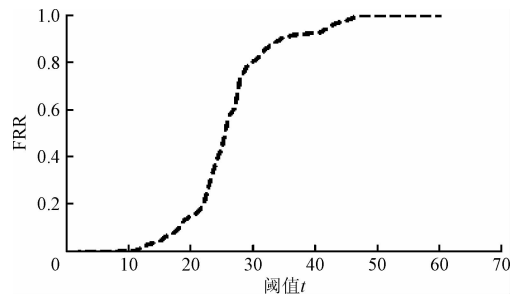


图 9 阈值 t 与 FRR 分布关系曲线

Fig. 9 Distribution relationship curve of FRR vs. threshold t

5.2.2 阈值 Y 的确定

由于裂缝严重危害生产和使用,雪糕棒生产企业对其检测十分严格,即裂缝允许存在的比率为 0.00%。为满足企业检测要求,本文算法最终的 FRR 必须低至 0%,而在此前提下 FAR 越小算法整体性能越好,即误检的雪糕棒数量越少,经济损失越小,因此根据该原则确定阈值 Y 。

在 5.2.1 节确定的阈值 t 下,本文算法对图库中任选的 300 幅图像共提取出 1 104 处裂缝候选边缘,其中真正的裂缝边缘 503 处,木纤维纹络 601 处,图 10 所示为不同 Y 取值下对该 1 104 处边缘检测的 FRR、FAR 效果,可见 FRR 随着 Y 的增加而增加,且当 $Y \leq 2.8$ 时 FRR 取值均为 0;同时可见,FAR 随着 Y 的增加而变小,因此根据上述原则,最终确定 Y 的取值为 2.8。

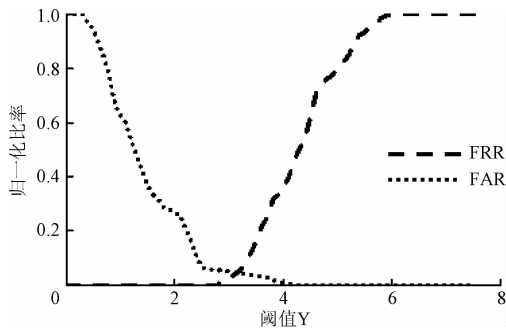


图 10 阈值 Y 与 FRR, FAR 分布关系曲线

Fig. 10 Distribution relationship curve of FRR and FAR vs. threshold Y

值得说明的一点是,5.2.1 节和 5.2.2 节所确定的参数 t 和 Y 的具体数值是基于 5.1 节环境下的,而当环境发生变化时,可通过重复 5.2 节的方法对其具体数值进行重新确定,以便于算法能够在所处环境下达到最佳效果。

5.3 算法效果与对比分析

为了进一步验证本文算法效果,对自建图像数据库 SUT-13 中的 422 幅图像进行了测试,并与其他雪糕棒表面裂缝纹理检测算法进行了对比分析。实验过程中 canny 算子的滤波参数、低阈值、高阈值分别为 1.4、1 和 3;3.1 节距离阈值 T_{dis} 的取值为 6。图 11 所示为本文算法检测实际效果,可见能够将对对比度较小、视觉上并不明显的裂缝准确提取出来,表明了本文算法的有效性。实验的具体数据结果如表 1 所示。

由表 1 可见,在保证 FRR 为 0 的前提下,本文方法的裂缝纹理检测 FAR 可达 6.07%,与其他方法相比,FAR 最小降低了 9.29%,显示出本文方法的优越性和高效性,对其原因进行分析,相对于其他方法本文算法在详细分析细小裂缝和木纤维各自特点的基础上提取了更具针对性的特征,能够有效描述两纹理的差异,因此取得了更好效果。

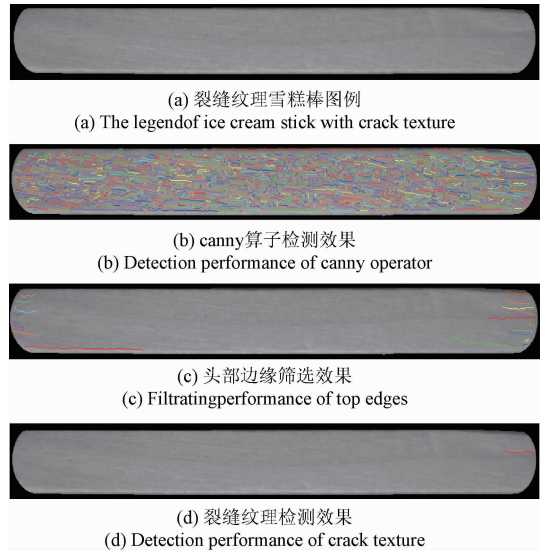


图 11 裂缝纹理检测过程及效果

Fig. 11 Detection process and performance of crack texture

表 1 本文方法与其它方法对比

Table 1 Comparison of the proposed method and other methods

方法	FRR/%	FAR/%	时间/s
直方图法 ^[21]	0	36.98	0.103 669
OTSU ^[16]	0	27.22	0.075 180 5
灰度共生矩阵+聚类 ^[17]	0	20.33	1.236 981
局部阈值分割法 ^[12]	0	15.36	1.236 900
本文方法	0	6.07	0.607 104

对上述检测结果中误检的案例进行分析,其原因是由于木纤维的纹络为木材自然生长而形成,则存在如图 12 所示的情况,即一条明显的纤维(如白色虚线矩形框标记)其两端区域纤维纹理并不明显(如黑色虚线矩形框标记),使得算法所得的其旁瓣灰度特征值大于设定的阈值,从而被误检为裂缝纹理。

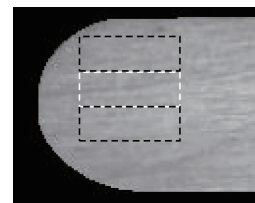


图 12 误检案例分析

Fig. 12 Analysis of a false accept case

6 结 论

针对雪糕棒表面闭合紧实的裂缝缺陷检测问题,本

文提出了基于纹理主瓣灰度特征和旁瓣灰度特征相结合的检测方案。建立了特征提取模型,详细阐述了算法原理和步骤,定义了算法性能评价指标,建立了实验图像数据库,并以企业实际需求为依据给出了算法关键参数的设置方法,在自建图像数据库上进行了算法效果验证并对实验效果进行了分析。实验结果显示,本文算法在拒真率 FRR 为 0 的情况下,认假率 FAR 低达 6.07%,表明了本文方法的有效性;相比于其他裂缝纹理检测方法, FAR 值最少降低了 9.29%,体现了本文算法的优势,对于雪糕棒表面裂缝缺陷检测的应用具有实际意义。

参考文献

- [1] JIAMYANGYUEN S, DELWICHE J F, HARPER W J. The impact of wood ice cream sticks' origin on the aroma of exposed ice cream mixes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(2):355-359.
- [2] 吴志仁,王德华. 雪条棒侧弯检测机构和设有这种检测机构的雪条棒自动检选机:CN 203605910 U [P]. 2014-05-21.
- WU ZH R, WANG D H. Testing institutions of the Length of the ice cream stick and the corresponding machine; CN 203605910 U [P]. 2014-05-21.
- [3] 吴志仁,霍福林. 雪糕棒自动检选机纵向弯曲检测机构:CN2498580 [P]. 2002-07-03.
- WU ZH R, HUO F L. Testing institutions of auto-picking buckling ice cream stick ;CN2498580 [P]. 2002-07-03.
- [4] 解秉江,方茂奎. 雪条棒自动精选机:CN2612246 [P]. 2004-04-21.
- XIE B J, FANG M K. Ice cream stick automatic sorting machine; CN2612246 [P]. 2004-04-21.
- [5] BOGUE R W. Machine vision theory, algorithms, practicalities [J]. *Assembly Automation*, 2005, 25(3):58.
- [6] DAHJYE L, ROBERT S, JAMES A, et al. Development of a machine vision system for automatic date grading using digital reflective near-infrared imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(3):388-398.
- [7] 吴志仁. 一种雪条棒影像检测装置和设有这种装置的雪条棒拣选机:中国, CN202372142U [P]. 2012-08-08.
- WU ZH R. An ice cream stick image detection device and the corresponding machine; China, CN202372142U [P]. 2012-08-08.
- [8] 吴志仁,郭晶忠. 雪条棒视觉拣选机:中国, CN201357148Y [P]. 2009-12-09.
- WU ZH R, GUO J ZH. Ice cream stick visual picker; China, CN201357148Y [P]. 2009-12-09.
- [9] 成丽佳. 雪糕棒质量在线视觉检测系统研制 [D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2016.
- CHENG L J. Design of ice cream bar quality detection system based on online visual inspection [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [10] 苑玮琦,李德健,李绍丽. 雪糕棒轮廓质量视觉在线检测方法 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(10):3185-3190.
- YUAN W Q, LI D J, LI SH L. Online method based on machine vision for measuring contour quality of ice cream stick [J]. *Application Research of Computer*, 2016, 33(10):3185-3190.
- [11] 陈丹. 雪糕棒表面瑕疵检测方法的研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2016.
- CHEN D. Research on defects detection of surface in ice cream bar [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [12] 苑玮琦,李绍丽,李德健. 基于子区域变尺度高斯拟合的木材表面缺陷识别 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4):879-886.
- YUAN W Q, LI SH L, LI D J. Wood surface defects recognition based on sub-region zoom Gaussian fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4):879-886.
- [13] 朱蕾. 木材表面缺陷图像识别的算法研究 [D]. 南京:南京林业大学, 2011.
- ZHU L. Study on the algorithm of identification of wood surface defect images [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [14] SHNHANORBANUN S, HUDA S A S N, HASLINA A, et al. A computational biological network for wood defect classification [J]. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2010, 2186(1):559-563.
- [15] ZHANG Y ZH, XU CH, LI CH, et al. Wood defect detection method with PCA feature fusion and compressed sensing [J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(3):745-751.
- [16] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66.
- [17] 吴东洋,业宁,苏小青. 基于灰度共生矩阵和聚类方法的木材缺陷识别 [J]. *计算机与数字工程*, 2010, 38(11):38-41.
- WU D Y, YE N, SU X Q. Wood defect recognition

based on GLCM and clustering algorithm [J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(11):38-41.

- [18] 吴东洋, 业宁, 沈丽容, 等. 基于颜色矩的木材缺陷聚类识别[J]. 江南大学学报:自然科学版, 2009, 8(5):520-524.

WU D Y, YE N, SHEN L R, et al. Clustering method for automatic timber defects detection based on the color moment [J]. Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition, 2009, 8(5):520-524.

- [19] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698.

- [20] BURTON B A. Enumeration of non-orientable 3-manifolds using face-pairing graphs and union-find[J]. Discrete & Computational Geometry, 2007, 38(3):527-571.

作者简介



苑玮琦, 1982 年于湖南大学获得学士学位, 分别在 1988 年和 1997 年于东北大学获得硕士和博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器视觉和生物特征识别。

E-mail: yuan60@126.com

Yuan Weiqi received his B. Sc. degree from Hunan University in 1982, and received M. Sc. and Ph. D. degrees both from

Northeastern University in 1988 and 1997, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interest includes machine vision and biometric identification.



李绍丽(通讯作者), 2013 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所博士研究生, 主要研究方向为机器视觉和生物特征识别。

E-mail: 707816215@qq.com

Li Shaoli (Corresponding author) received her B. Sc. from Shenyang University of Technology in 2013. Now she is a Ph. D. candidate in Computer Vision Group, Shenyang University of Technology. Her main research interest includes machine vision and biometric identification.



李德健, 2013 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所博士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

E-mail: 707816215@qq.com

Li Dejian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2013. Now he is a Ph. D. candidate in Computer Vision Group, Shenyang University of Technology. His main research interest includes machine vision and biometric identification.