

基于机器视觉的聚氯乙烯管材表面缺陷检测

李书华¹, 周亚同^{1*}, 王丹¹, 何静飞¹, 张忠伟²

¹河北工业大学电子信息工程学院天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401;

²北京市安视中电科技有限公司, 北京 100871

摘要 针对人工肉眼检测聚氯乙烯(PVC)管材表面缺陷效果差、效率低下等问题,设计了一种基于机器视觉的PVC管材表面缺陷检测算法,并将其用于工业生产。该算法主要包含图像预处理和缺陷检测两部分,图像预处理包括边缘遍历、条纹检测和Gamma变换等步骤;缺陷检测主要包括水平与垂直投影、快速区域生长法连通域标记和分块处理等步骤。该算法对Gamma变换以及区域生长法作加速处理,同时能够最大限度地检测出PVC管材表面缺陷并避免误检。实验及工厂实地检测结果表明,该算法检测准确率为97.6%,实时检测速度超过60 m/min,缺陷最小检测面积为0.05 mm²,而且管材运行中单边抖动不超过5 mm时无误报警现象发生,管材在运行速度为45 m/min时漏检率为0,因而能满足实际生产需要。

关键词 图像处理; 表面缺陷检测; 聚氯乙烯管材; 区域生长法; 投影法; 分块法

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131006

Surface Defect Detection of Polyvinyl Chloride Pipes Based on Machine Vision

Li Shuhua¹, Zhou Yatong^{1*}, Wang Dan¹, He Jingfei¹, Zhang Zhongwei²

¹ Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

² Beijing Anshi ChineLec Ltd., Beijing 100871, China

Abstract This study proposes a machine vision-based surface defect detection algorithm to enhance the effect and efficiency of detecting surface defects in polyvinyl chloride (PVC) pipes for industrial production. The algorithm performs image preprocessing and defect detection. Image preprocessing includes steps such as edge traversal, fringe detection, and Gamma transformation. Defect detection mainly includes horizontal and vertical projection, fast region growing for connected region marking, and block processing. The proposed algorithm accelerates the Gamma transformation and region growing, and it can also be used to optimally detect surface defects in PVC pipes, while avoiding false detection. Results of tests and actual factory inspections suggest that the proposed algorithm achieves a detection accuracy of 97.6%, with a real-time detection speed of >60 m/min, and a minimum defect detection area of 0.05 mm². Moreover, a unilateral jitter of <5 mm does not cause any false alarms and the missed detection rate is 0 when the pipe runs at a speed of 45 m/min, which meets actual production needs.

Key words image processing; surface defect detection; polyvinyl chloride pipe; region growing; projection; block processing

OCIS codes 100.2000; 100.3005; 100.3008; 100.5010

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61801164)、河北省引进留学人员资助项目(CL201707)、教育部春晖计划项目(Z2017015)、河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2018012)

* E-mail: zyt@hebut.edu.com

1 引言

聚氯乙烯(PVC)管材具有质量小、耐酸碱腐蚀和阻燃耐老化等优点,凭借良好的性能与价格优势,在管材市场占据着举足轻重的地位^[1]。因此,PVC管材表面质量检测有很大的市场需求。在PVC管材的制造过程中,由于原材料、生产设备以及生产环境等问题,管材表面很容易出现褶皱、杂质、污染、划痕、凹坑和气泡等缺陷。目前在生产车间中主要依靠工人对管材表面进行观察并发现缺陷^[2],这种肉眼观察法具有很多弊端^[3-4],如人工成本高、存在较大的主观性,以及容易发生漏检和误检、工人检测速度慢等,无法保证检测效率。

目前,基于机器视觉的表面缺陷检测算法主要分为3类:模型法、频谱法与统计法。模型法通过分形体^[5]、随机场模型^[6]和反散射模型^[7]等描述表面缺陷特征;频谱法通过傅里叶特征^[8]、小波特征^[9]和Gabor特征^[10]等描述物体表面缺陷特征;统计法通过直方图统计特征^[11]、自相关法^[12]和形态学法^[13]等描述物体表面缺陷特征。

已有学者对PVC管材表面缺陷检测进行了研究,但相关文献较少。马艳^[14]将边缘检测技术应用到PVC管材检测中,对比分析了多种边缘检测算子的检测效果;龙晓薇等^[15-16]将图像分割和形态学处理引入PVC管材表面缺陷检测,并对检测到的缺陷初步分类;Dehghan等^[17]设计了全方位成像方案,以获取最佳空间分辨率管材图像;Prabuwono等^[18]设计了流水线上PVC塑料瓶缺陷在线视觉检测系统,对流水线上转速为106 r/min的塑料瓶图像采集精度达94.264%,为在线视觉检测提供了理论基础。这些学者均通过相应的检测系统,取得了较好的实验效果。然而,能够胜任实际工厂生产环境PVC管材表面检测平台的却鲜有报道。

在实际生产中,高温环境下生产的PVC管材通常用水冷却,管材表面残留的水珠会影响管材检测效果;PVC管材型号较多,单一检测方法很难应用到所有型号的管材检测中;此外,检测算法还需要适应PVC管材生产线速度,保证工厂生产效益等。

针对以上问题,本文提出了一种基于机器视觉的PVC管材表面检测算法,以相应的硬件作支持,真正地PVC管材表面检测应用到实际工厂环境中,检测准确性与检测速度均满足工厂生产检测要求。

2 PVC 管材表面检测平台

基于机器视觉的PVC管材表面检测平台内部结构如图1所示,PVC管材穿过设备内部的区域为密闭空间,环形光源仅为穿过的管材提供合适亮度照明,其他部分无照明。4个工业相机以管材圆心为中心,两两间隔 90° 形成一个圆,且镜头方向均与管材切面成 30° 排列,每个相机分别负责拍摄PVC管材的 $1/4$ 表面,本文示例图片均为单个相机采集的图像。

本检测平台采用研华科技610L工业控制计算机、朗歌斯触摸屏显示器、海康威视200万工业CCD灰度相机、海康威视12 mm工业镜头和锐视科技定制环形防水光源,光源中心留有圆孔令PVC管材穿过。此外,还配备塑胶环形滤水圈,PVC管材通过时便可滤除绝大部分残留在表面的水珠。工业生产中,常见PVC管材表面缺陷包括褶皱、杂质、污染、划痕、凹坑和气泡等,图2为生产线上工业相机采集到的缺陷图像。

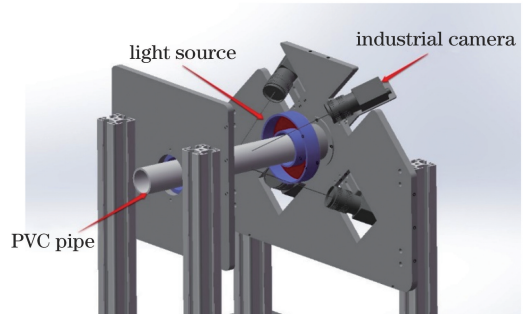


图1 PVC 管材表面检测平台

Fig. 1 Surface detection platform of PVC pipes

3 PVC 管材表面缺陷检测算法

3.1 查表法快速 Gamma 变换

受光源亮度或管材运动过程产生抖动等因素的影响,相机抓取到的图像会出现对比度较低、缺陷显示效果不明显等情形,直接影响最终检测结果。因此,需要对图像进行Gamma变换,以保证检测结果的准确性。

传统Gamma变换^[19]需要对图像中所有像素点进行计算,相同参数下像素值相同的点经Gamma变换后值相同,造成重复计算。为降低检测算法的冗余度,提高运行速度,采用查表法进行快速Gamma变换。按照图3中的对应关系,将原图中 $[0\sim 255]$ 范围内的像素值(方格中左下角数值)与Gamma变换后的值(箭头指向的值)一一对应,通

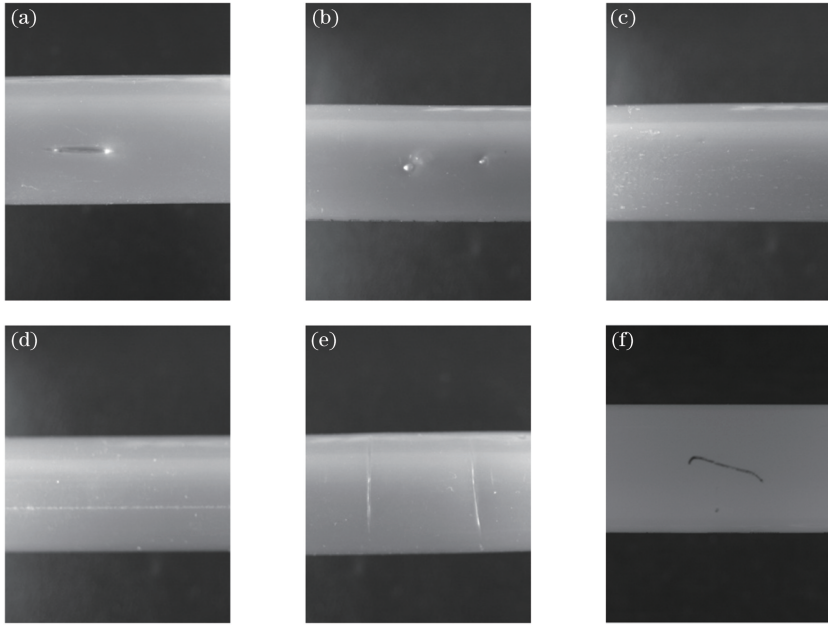


图 2 PVC 管材表面缺陷图。(a)凹坑;(b)气泡;(c)杂质;(d)褶皱;(e)划痕;(f)污染

Fig. 2 Surface defects on PVC pipes. (a) Pits; (b) bubbles; (c) impurities; (d) wrinkles; (e) scratches; (f) pollution

0 [↗] 0	1 [↗] 0	2 [↗] 0	3 [↗] 0	4 [↗] 0	5 [↗] 0	6 [↗] 0	7 [↗] 0	8 [↗] 0	9 [↗] 0	10 [↗] 0	11 [↗] 0	12 [↗] 0	13 [↗] 0	14 [↗] 0	15 [↗] 0
16 [↗] 0	17 [↗] 0	18 [↗] 0	19 [↗] 0	20 [↗] 0	21 [↗] 0	22 [↗] 0	23 [↗] 0	24 [↗] 0	25 [↗] 0	26 [↗] 0	27 [↗] 0	28 [↗] 0	29 [↗] 0	30 [↗] 0	31 [↗] 0
32 [↗] 0	33 [↗] 0	34 [↗] 0	35 [↗] 0	36 [↗] 0	37 [↗] 0	38 [↗] 0	39 [↗] 0	40 [↗] 0	41 [↗] 0	42 [↗] 0	43 [↗] 0	44 [↗] 0	45 [↗] 0	46 [↗] 0	47 [↗] 0
48 [↗] 0	49 [↗] 0	50 [↗] 0	51 [↗] 0	52 [↗] 0	53 [↗] 0	54 [↗] 0	55 [↗] 0	56 [↗] 0	57 [↗] 0	58 [↗] 0	59 [↗] 1	60 [↗] 1	61 [↗] 1	62 [↗] 1	63 [↗] 2
64 [↗] 2	65 [↗] 2	66 [↗] 2	67 [↗] 3	68 [↗] 3	69 [↗] 4	70 [↗] 4	71 [↗] 4	72 [↗] 5	73 [↗] 5	74 [↗] 6	75 [↗] 6	76 [↗] 7	77 [↗] 7	78 [↗] 8	79 [↗] 9
80 [↗] 9	81 [↗] 10	82 [↗] 10	83 [↗] 11	84 [↗] 12	85 [↗] 13	86 [↗] 13	87 [↗] 14	88 [↗] 15	89 [↗] 16	90 [↗] 17	91 [↗] 17	92 [↗] 18	93 [↗] 19	94 [↗] 20	95 [↗] 21
96 [↗] 22	97 [↗] 23	98 [↗] 24	99 [↗] 25	100 [↗] 26	101 [↗] 27	102 [↗] 28	103 [↗] 29	104 [↗] 31	105 [↗] 32	106 [↗] 33	107 [↗] 34	108 [↗] 35	109 [↗] 37	110 [↗] 38	111 [↗] 39
112 [↗] 41	113 [↗] 42	114 [↗] 43	115 [↗] 45	116 [↗] 46	117 [↗] 47	118 [↗] 49	119 [↗] 50	120 [↗] 52	121 [↗] 53	122 [↗] 55	123 [↗] 56	124 [↗] 58	125 [↗] 60	126 [↗] 61	127 [↗] 63
128 [↗] 65	129 [↗] 66	130 [↗] 68	131 [↗] 70	132 [↗] 71	133 [↗] 73	134 [↗] 75	135 [↗] 77	136 [↗] 79	137 [↗] 81	138 [↗] 82	139 [↗] 84	140 [↗] 86	141 [↗] 88	142 [↗] 90	143 [↗] 92
144 [↗] 94	145 [↗] 96	146 [↗] 98	147 [↗] 100	148 [↗] 102	149 [↗] 105	150 [↗] 107	151 [↗] 109	152 [↗] 111	153 [↗] 113	154 [↗] 116	155 [↗] 118	156 [↗] 120	157 [↗] 122	158 [↗] 125	159 [↗] 127
160 [↗] 129	161 [↗] 132	162 [↗] 134	163 [↗] 137	164 [↗] 139	165 [↗] 142	166 [↗] 144	167 [↗] 147	168 [↗] 149	169 [↗] 152	170 [↗] 154	171 [↗] 157	172 [↗] 159	173 [↗] 162	174 [↗] 165	175 [↗] 167
176 [↗] 170	177 [↗] 173	178 [↗] 178	179 [↗] 181	180 [↗] 184	181 [↗] 187	182 [↗] 190	183 [↗] 193	184 [↗] 196	185 [↗] 199	186 [↗] 200	187 [↗] 201	188 [↗] 204	189 [↗] 207	190 [↗] 210	191 [↗] 214
192 [↗] 217	193 [↗] 220	194 [↗] 223	195 [↗] 226	196 [↗] 229	197 [↗] 232	198 [↗] 235	199 [↗] 239	200 [↗] 242	201 [↗] 245	202 [↗] 248	203 [↗] 252	204 [↗] 255	205 [↗] 255	206 [↗] 255	207 [↗] 255
208 [↗] 255	209 [↗] 255	210 [↗] 255	211 [↗] 255	212 [↗] 255	213 [↗] 255	214 [↗] 255	215 [↗] 255	216 [↗] 255	217 [↗] 255	218 [↗] 255	219 [↗] 255	220 [↗] 255	221 [↗] 255	222 [↗] 255	223 [↗] 255
224 [↗] 255	225 [↗] 255	226 [↗] 255	227 [↗] 255	228 [↗] 255	229 [↗] 255	230 [↗] 255	231 [↗] 255	232 [↗] 255	233 [↗] 255	234 [↗] 255	235 [↗] 255	236 [↗] 255	237 [↗] 255	238 [↗] 255	239 [↗] 255
240 [↗] 255	241 [↗] 255	242 [↗] 255	243 [↗] 255	244 [↗] 255	245 [↗] 255	246 [↗] 255	247 [↗] 255	248 [↗] 255	249 [↗] 255	250 [↗] 255	251 [↗] 255	252 [↗] 255	253 [↗] 255	254 [↗] 255	255 [↗] 255

图 3 Gamma 变换快速查找表

Fig. 3 Table used to quickly look up Gamma transformation

过查找法便可找到 Gamma 变换后的新值,不必对每幅图像的所有像素点进行重复计算,可大幅提高图像预处理速度,减少不必要的时

间。Gamma 变换处理效果如图 4 所示,其中图 4 (a)为相机拍摄的原图,除去图像中间的管材部分还有较多背景,实际检测时根据管材边缘检测结

果只检测图 4 (b)中管材部分,图 4 (c)为 Gamma 变换后的结果。与图 4 (b)对比发现,Gamma 变换后褶皱区域与周围正常区域像素值差异更大,对比度更明显,而且正常区域图像更加平滑,可大大减少误检情况的发生,处理结果更适合进一步的缺陷检测。

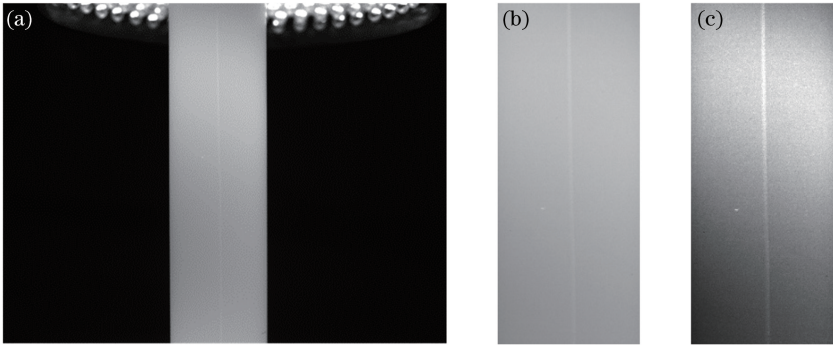


图4 Gamma变换以及对比图。(a)原图;(b)褶皱区域;(c) Gamma变换效果图

Fig. 4 Gamma transformation and contrast diagrams. (a) Original image; (b) area of wrinkle; (c) image after Gamma transformation

3.2 水平投影与垂直投影

水平投影是将图像中每一行中所有像素点的像素值累加求和,同理,垂直投影则将每列所有像素点的像素值累加求和。然后统计在一个坐标系中^[20]。第*i*行的水平投影和第*j*列的垂直投影分别为

$$\begin{cases} P_h(i) = \sum_{j=1}^N x(i, j) \\ P_v(j) = \sum_{i=1}^W x(i, j) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $x(i, j)$ 为图像中*i*行*j*列点像素值,图像大小为 $N \times W$ 。由于管材表面缺陷部分像素值与正常区域相比会有较明显的差异,可以通过对比每行(列)之间投影值是否有较大变化,判定缺陷是否存在,定位缺陷位置。图4(c)垂直投影结果如图5所示。其中NC为图像中像素列数,Sum为每列所有点像素值累加值。从图5可以看出,在第150列位置垂直投影值与周围区域对比出现较为明显的变化,对应原图150列位置出现的褶皱缺陷,检测结果准确。同理,水平投影方法对管材表面横向褶皱检测效果较明显。

通过大量计算和实验发现,相比传统投影法,投影值一阶微分的5差值[以垂直投影为例: $P_v(j+5) - P_v(j)$]在缺陷区域变化更大,且在正常区域取值区间与波动均较小。图4(c)管材的投影一阶微分5差值如图6所示,图中SDV为对每列投影值求一阶微分5差值的结果。对比图5和图6可以发现,与传统投影结果相比,同一帧管材图像投影一阶微分5差值在管材正常区域波动范围相对更窄,同时,褶皱缺陷所在区域的波动起伏更大,正常区域与缺陷区域的对比更明显。因此,在计算中缺陷区域的投影一阶微分5差值与正常区域的比值更大。所

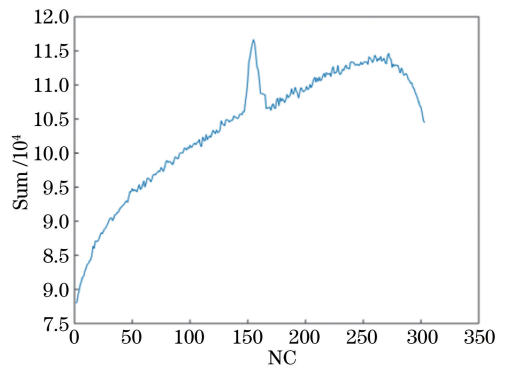


图5 管材垂直投影结果

Fig. 5 Vertical projection results of pipe

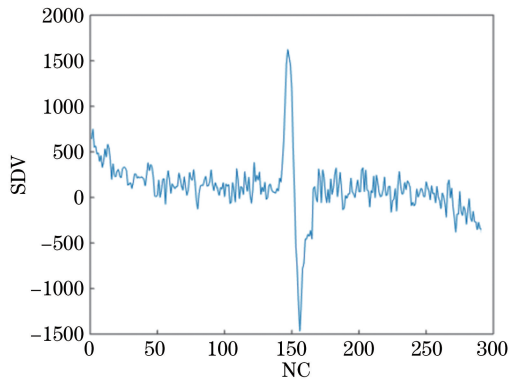


图6 垂直一阶微分5差值

Fig. 6 Vertical first-order differential with five differences
以在缺陷判断时可以将阈值设定的更大,避免阈值过小导致对管材正常区域的误检,从而精确检测管材图像中管材表面缺陷。最终采用投影值的一阶微分5差值作为缺陷判定指标。

3.3 快速区域生长法寻找连通域

连通域标记可以对图像中的目标进行提取,并分析其几何特征。前期实验与工厂实际检测发现,可以通过寻找管材表面灰度图像中连通域的方法标记PVC管材表面缺陷。

采用区域生长法寻找连通域时,需遍历种子点及聚合后的每个生长点的邻域,由于邻近点的邻域重合,造成大量重复计算,使整个检测系统的运行速度难以得到提升。对此,文献[21]对区域生长法做了加速改进,在一定程度上避免了重复计算,节省了算法运行时间。但该算法需要对生长段前后两行进行生长,仍存在一定的重复计算。

在管材图像中,点状缺陷是部分像素点聚集在一起形成的连通区域。点状缺陷以及图像中由几个像素点聚集成的较小噪声点都有可能被检测到,造成误检。因此,在实际检测中,适当减少对图像的搜索次数,既可避免误检又可提高速度。本文进一步加速改进区域生长法,改进算法步骤为:

1) 缺陷区域的像素值与周围正常区域有较大差异,因此在选择生长点时,首先设定最大和最小2个像素阈值对缺陷进行限定,该幅图像中像素值在两阈值范围内的点,均判为不合格点,并将像素值置为0,以此作为生长点选择依据。

2) 按从左到右、从上到下的顺序对图像进行遍历处理,若首行首列像素值为零,则判为种子点,否则不作处理;对该行所有点依次进行判断,在从左到

右的寻找过程中,若像素值由非零变为零,则记该点为种子生长点,将该行之后的所有像素值为零的点归入一个生长段,直到再次出现非零点,将其记为生长段终止点;若每行末尾点像素值为0,则同样判为生长终止点。

3) 生长段寻找完成后,由当前行对下一行进行区域生长,由种子生长点开始,经过生长段到生长终止点为止,判断下一行同列的点 $x(i, j+1)$ 以及前后两像素点 $x(i-1, j+1)$ 、 $x(i+1, j+1)$ 是否有像素值为零的点,若有则合并,若没有则对下一个存储的生长点进行同样方式的生长。

4) 生长完成后的所有被合并的点形成一个区域,即为缺陷部位。

在检测过程中,上述步骤中所有生长点、生长段以及终止点的坐标均需保存在相对应的矢量变量里,方便后续计算。图7为该快速区域生长法的示意图,为简单起见,不合格点像素值记为0,其他点均记为1,图7(b)中括号标记的点即为步骤1)中存储的生长点、生长段以及终止点。因此,当前行可以按照步骤2)对下一行进行生长,生长结果如图7(c)所示,矩阵内被括号标记出的两个区域即为缺陷所在区域。

$$\begin{aligned}
 & \text{(a)} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{(b)} \begin{bmatrix} 1 & 1 & [0 & 0] & 1 & 1 & 1 & 1 & [0] \\ [0 & 0] & 1 & 1 & 1 & 1 & [0 & 0] & 1 \\ 1 & 1 & [0 & 0] & 1 & 1 & 1 & [0 & 0] \end{bmatrix} \\
 & \text{(c)} \left[\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} 1 \quad 1 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right]
 \end{aligned}$$

图7 快速区域生长示意图。(a)原图矩阵中的生长点;(b)每行生长结果;(c)最终生长结果

Fig. 7 Schematic of fast region growing. (a) Growing point in original matrix; (b) growing results per line; (c) final growing result

3.4 管材图像分块精准检测

采用上述处理方式仍未检测出PVC管材表面缺陷时,需对图像进行更深入的分块处理,该处理步骤对较小的缺陷具有很好的敏感性,可以进一步提高检测精度。通过大量实验以及现场检测结果发现,当原图像为 $800 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,分块后每个子块大小为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 时检测效果最好。

分块处理后分别求得每个子块的像素均值

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} x(i, j)}{15 \times 15}. \quad (2)$$

之后再对每个子块单独检测。先求得每点的像素值与均值 \bar{y} 差的绝对值 $y_d(x, y)$,再将其与本子块中之前所有做同样计算的点的结果相加求均值得到 \bar{y}_{sum} ,即

$$\begin{aligned}
 y_d(i, j) &= |x(i, j) - \bar{y}|, \quad (3) \\
 \bar{y}_{\text{sum}} &= \frac{\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} |x(i, j) - \bar{y}|}{15 \times 15} = \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} y_d(i, j). \quad (4)
 \end{aligned}$$

最终判断该子块是否存在缺陷时,将二者数值进行对比

$$\begin{cases} y_d(i, j) > \bar{y}_{sum}, \text{defect} \\ y_d(i, j) \leq \bar{y}_{sum}, \text{passed} \end{cases} \quad (5)$$

对该子块中一点 $x(i, j)$, 当 $y_d(i, j)$ 大于 \bar{y}_{sum} 时, 表明此点像素值与整幅图像均值相比有较大变化, 判为疑似缺陷点, 存储该点位置, 否则不作任何处理。当某个位置相邻缺陷点数量达到设定阈值后, 便将该区域判为缺陷区域。

PVC 管材表面的点状缺陷如图 8(a) 所示, 图 8(b) 为其分块检测结果, 其中横坐标 NB 为该图像

所分块数, 纵坐标 Sum 为本块中所有点像素值与子块像素均值差的绝对值之和, 图 8(c) 纵坐标 SDV 为图 8(b) 作一阶微分后的结果, 即 $y_d(i, j)$, 二者值均在 500~700 块之间出现较大波动, 该位置对应原图中缺陷存在区域。通过对比发现, 在缺陷存在处, 块的一阶微分值 $y_d(i, j)$ 与均值 \bar{y}_{sum} 的比值与正常区域之间的比值在数值上有很大差异, 能够保证检测结果的精度与稳定性, 可以作为缺陷点的判断依据。

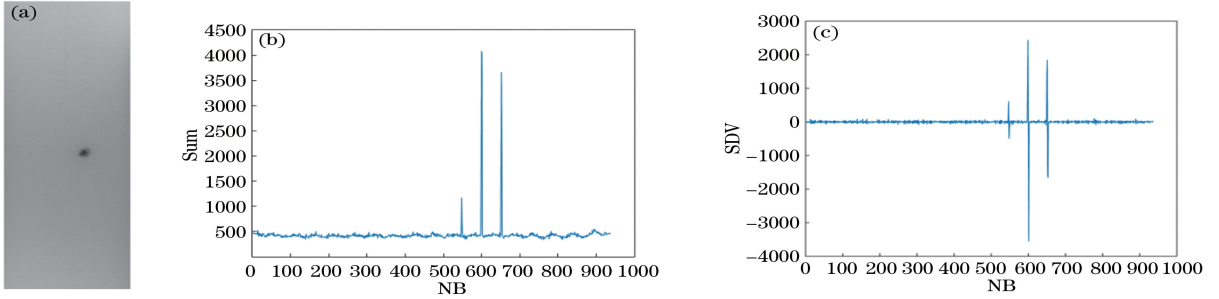


图 8 分块效果图。(a)点状缺陷;(b)分块投影;(c)分块一阶微分

Fig. 8 Effect of block processing. (a) Point defect; (b) block projection; (c) block first-order differential

4 实验部分

为验证本文算法在实际检测环境中的可行性, 与相应的硬件设备结合, 在 Visual Studio 2010 (VS2010) 环境下开发了 PVC 管材表面缺陷检测平台。

该平台检测算法流程如图 9 所示, 开始检测时通过遍历边缘检测法, 对输入的一帧图像进行遍历, 根据图像中管材像素值与背景区域的差异自动探测有无管材边缘, 管材边缘存在则表示有管材输入该设备:

1) 若无 PVC 管材输入, 对该帧图像不作任何处理, 继续读取下一帧图像, 判断是否有管材边缘存在, 为等待检测状态。

2) 若有 PVC 管材输入, 对拍摄到的图像进行预处理, 通过遍历条纹检测法, 遍历图像寻找设定范围像素值, 判断管材表面条纹数量, 通过条纹识别结果对该帧图像进行图 9 相应的检测步骤, 判断输入图像中 PVC 管材表面是否存在缺陷, 为检测状态。

实验验证以及对日丰、日泰和华信等 PVC 管材的现场检测结果表明, 该算法能检测直径为 16~32 mm 的管材, 可检测颜色包括白色、红色、绿色、蓝色、橙色、紫色、黄色、金色、粉红、灰色, 以及各颜色的亚光与亮光情形, 实时检测速度超过 60 m/min,

缺陷最小检测面积为 0.05 mm^2 , 检测准确率可达 97.6%, 误检率为 0.27%, 且管材运行中单边抖动小于 5 mm 不产生误报警, 管材在运行速度为 45 m/min 时漏检率为 0, 满足实际生产检测需求。

图 10 为对管材表面凹坑、杂质、气泡、褶皱、划痕与污染的检测结果, 标记为红色或绿色矩形。可以看出, 管材表面缺陷均能够被检测并标记出来。此外, 图 10(a)、(c)、(f) 中的较小缺陷也被检测出来, 最大程度避免了漏检, 图 10(b) 采用矩形块将较密集的杂质点出现区域圈出, 作为对该缺陷出现的提示。检测到缺陷均会触发报警, 并将结果图片保存到以当日日期命名的文件夹内, 用以取证。

该算法除检测结果准确性好、精度高外, 还对 Gamma 变换以及区域生长法作了加速改进。因此, 设计了一系列实验对加速效果进行量化对比分析, 所有实验均运行在 64 位 Windows 7 系统、Intel Core i5 2.5 GHz CPU、4 GB RAM 的 PC 环境中, 运行软件同样为 VS2010。

表 1 为查表法 Gamma 变换与传统 Gamma 变换分别对 10 幅图像 (大小均为 $800 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$) 进行处理的结果, 对比两种方法的处理用时可以发现: 与传统方法相比, 查表法 Gamma 变换大幅提高了对图像的处理速度, 能够保证检测系统适应高速运行环境。表 2 为采用区域生长法对 10 幅同样大小的图像进行连通域标记所用

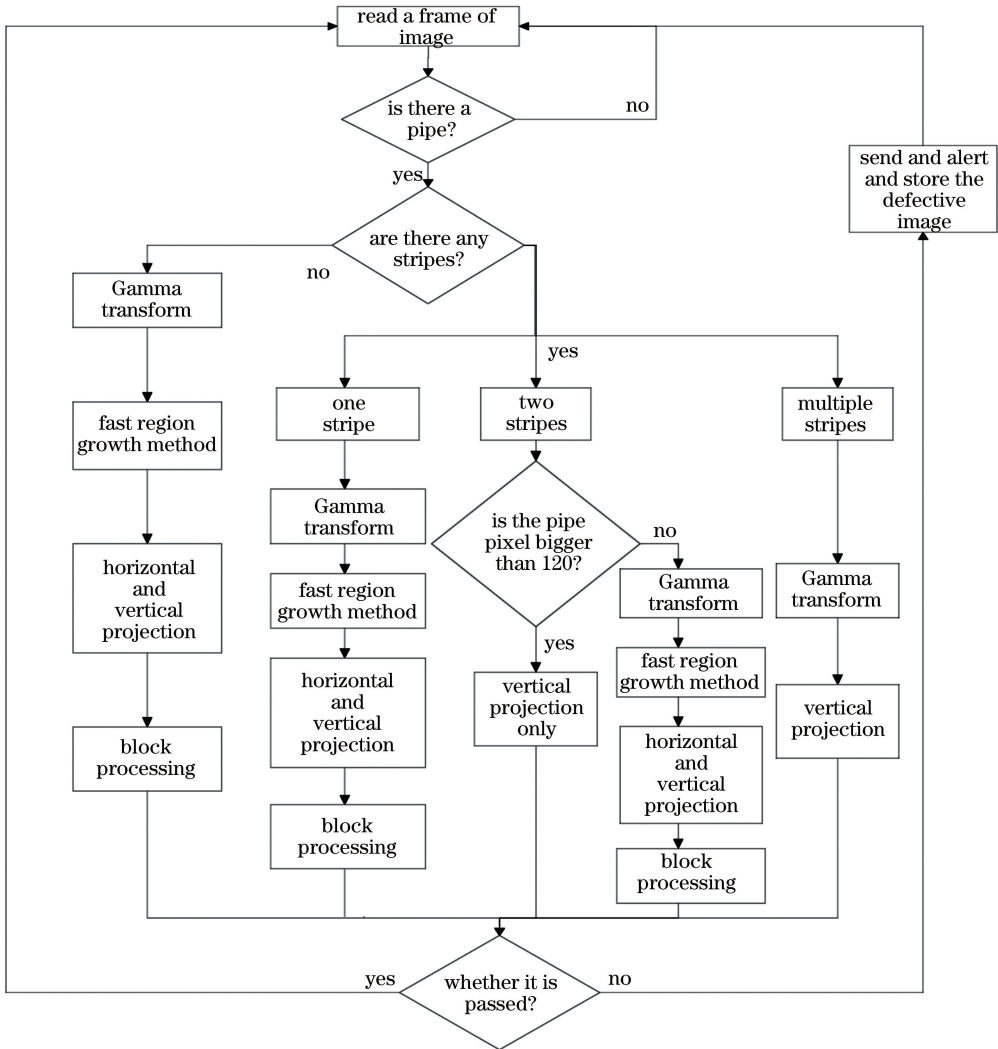


图 9 PVC 管材表面检测平台检测流程图

Fig. 9 Test flow chart of surface detection platform of PVC pipes

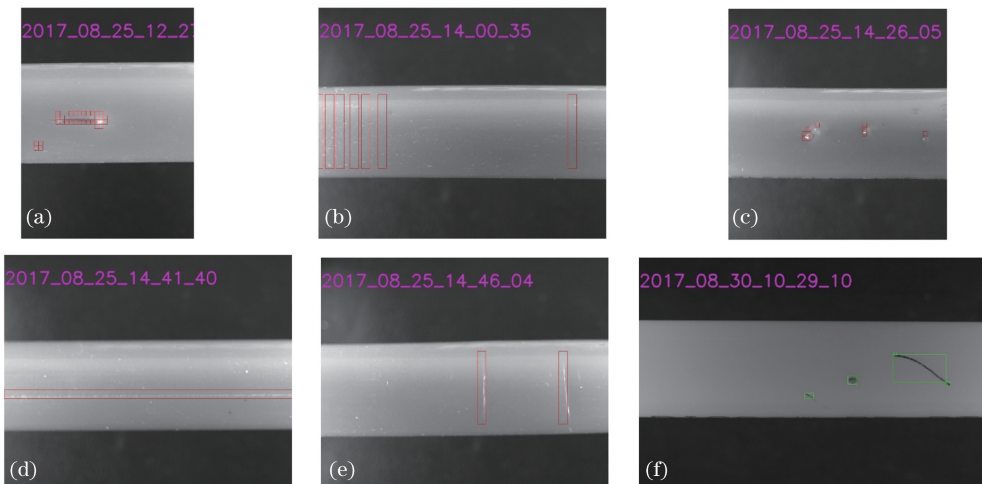


图 10 PVC 管材表面缺陷在线检测平台检测结果。(a)凹坑;(b)杂质;(c)气泡;(d)褶皱;(e)划痕;(f)污染

Fig. 10 Detection results of surface defect online detection platform of PVC pipes. (a) Pits; (b) impurities; (c) bubbles;

(d) wrinkles; (e) scratches; (f) pollution

时间,标记前均对图像中PVC管材所在位置设定感兴趣区域,检测时仅对感兴趣区域进行检测,该区域小于原图。可以看出,本文提出的快速区域生长法在速度方面提升数倍。同时在实际检测中发现,检测效果无大幅下降,能够保证系统的稳健性。

表1 Gamma变换法的用时对比

Table 1 Comparison of time cost for Gamma transformation

Image number	Gamma	Gamma transformation
	transformation / ms	using look-up method /ms
1	67.7	4.6
2	61.8	3.5
3	65.7	2.9
4	68.1	4.0
5	67.0	4.0
6	64.8	3.3
7	64.2	4.3
8	65.0	3.2
9	72.4	3.9
10	63.7	3.7

表2 区域生长法的用时对比

Table 2 Comparison of time cost for region growing

Image number	Region	Fast region
	growing /ms	growing /ms
1	67.7	4.6
2	61.8	3.5
3	65.7	2.9
4	68.1	4.0
5	67.0	4.0
6	64.8	3.3
7	64.2	4.3
8	65.0	3.2
9	72.4	3.9
10	63.7	3.7

5 结 论

针对实际工业生产中对PVC管材表面质量检测需求,设计了一种基于机器视觉的PVC管材表面缺陷快速检测算法,通过与必要的硬件设备结合成检测平台,实现了对实际工厂生产线上PVC管材表面缺陷的快速检测。该检测算法将投影法、区域生长法、分块法应用到表面缺陷检测中,经实验证实,该算法分别能够精确检测PVC管材的条状缺陷、点状块状缺陷与细小缺陷。工厂实地检测证实,能够检测16~32 mm直径管材,可检测颜色包括白色、红色、绿色、蓝色、橙色、紫色、黄色、金色、粉红、灰

色,以及各颜色的亚光与亮光情形,缺陷最小可检测面积为0.05 mm²,检测速度最高可达60 m/min,综合检测准确率为97.6%。同时,设备能满足管材运行中单边抖动不大于5 mm时不产生误报警现象,能保证管材在运行速度45 m/min时漏检率为0。各指标均达到了实际生产中的检测要求。

参 考 文 献

- [1] Li C W, Zuo J C. Technology status-quo and development direction of PVC pipes [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(4): 711-714.
李成吾, 左继成. 国内外PVC管技术现状及发展方向[J]. 当代化工, 2015, 44(4): 711-714.
- [2] Lu R S, Wu A, Zhang T D, et al. Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815002.
卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815002.
- [3] Yuan W Q, Li S L, Li D J. Detection of ice cream stick crack defects based on texture mainlobe and sidelobe features [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2779-2787.
苑玮琦, 李绍丽, 李德健. 基于纹理主、旁瓣特征的雪糕棒裂缝缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2779-2787.
- [4] Li K B, Yu H Y, Zhou S J. Surface scratch detection of mechanical parts based on morphological features [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815127.
李克斌, 余厚云, 周申江. 基于形态学特征的机械零件表面划痕检测[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815127.
- [5] Zheng H, Jiang B, Lu H F. An adaptive neural-fuzzy inference system (ANFIS) for detection of bruises on Chinese bayberry (Myrica rubra) based on fractal dimension and RGB intensity color [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 663-667.
- [6] Cohen F S, Fan Z, Attali S. Automated inspection of textile fabrics using textural models [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 803-808.
- [7] Chao S M, Tsai D M. Anisotropic diffusion with generalized diffusion coefficient function for defect detection in low-contrast surface images [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(5): 1917-1931.

- [8] Tsai D M, Hsieh C Y. Automated surface inspection for directional textures [J]. *Image and Vision Computing*, 1999, 18(1): 49-62.
- [9] Hu G H, Wang Q H. Fabric defect detection via undecimated wavelet decomposition and Gumbel distribution model[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2018, 13(1): 15-32.
- [10] Wang Q X, Li D, Zhang W J, *et al.* Unsupervised defect detection for gold surface of flexible printed board[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 981-987.
王庆香, 李迪, 张舞杰, 等. 软性电路板金面缺陷的无监督检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 981-987.
- [11] Wang Z R, Fang Y M, Feng H L, *et al.* Method for wooden knot detection and localization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051501.
王泽润, 方益明, 冯海林, 等. 木材节子缺陷检测与定位方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051501.
- [12] Jeong Y S, Kim S J, Jeong M K. Automatic identification of defect patterns in semiconductor wafer maps using spatial correlogram and dynamic time warping [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(4): 625-637.
- [13] Chen G F, Guan G Y, Wei X. Online stamping parts surface defects detection based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011501.
陈广锋, 管观洋, 魏鑫. 基于机器视觉的冲压件表面缺陷在线检测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011501.
- [14] Ma Y. The application research of PVC product inspection by edge detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004: 19-27.
马艳. 边缘检测技术在 PVC 型材产品检测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004: 19-27.
- [15] Long X W. PVC surface defect detection method based on image vision and application[D]. Changsha: Central South University, 2007: 9-19.
龙晓薇. 基于图像视觉的 PVC 表面缺陷检测方法及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 9-19.
- [16] Long X W, Yang C H, Long Y H. Research and design on surface defect detection system for PVC building materials [J]. *Computing Technology and Automation*, 2010, 29(2): 46-50.
龙晓薇, 阳春华, 龙永红. PVC 建材表面缺陷检测系统研究与设计[J]. *计算技术与自动化*, 2010, 29(2): 46-50.
- [17] Dehghan Tezerjani A, Mehrandezh M, Paranjape R. Optimal spatial resolution of omnidirectional imaging systems for pipe inspection applications [J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2015, 9(4): 261-294.
- [18] Prabuwo A S, Sulaiman R, Hamdan A R, *et al.* Development of intelligent visual inspection system (IVIS) for bottling machine[C] // TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference, November 14-17, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2006: 343887.
- [19] Zhang Z, Wang Y P, Xue G X. Digital image processing and machine vision: implementation of Visual C++ and Matlab [M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014: 70-72.
张铮, 王艳萍, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉: Visual C++与 Matlab 实现[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 70-72.
- [20] Jiang X X, Zhang Z J, Wang Y N, *et al.* PET full bottle fast detection based on gradient diffusion of gray projection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(8): 1152-1159.
蒋笑笑, 张振军, 王耀南, 等. 基于灰度投影梯度扩散的 PET 满瓶快速检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(8): 1152-1159.
- [21] Gao H B, Wang W X. New connected component labeling algorithm for binary image [J]. *Computer Applications*, 2007, 27(11): 2776-2777, 2785.
高红波, 王卫星. 一种二值图像连通区域标记的新算法[J]. *计算机应用*, 2007, 27(11): 2776-2777, 2785.