

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211210

# 基于视觉图像的车身漆膜微小疵病检测方法\*

张苗苗<sup>1,2</sup> 王 莹<sup>1,2</sup> 顾 灏<sup>1,2</sup> 韩 焱<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

**摘要:** 汽车漆膜能够保护车身不受外界环境的腐蚀,但是由于生产工艺的影响,汽车漆膜在涂装时会出现多种类型的疵病,因此汽车漆膜的微小疵病检测是现在汽车生产自动化发展的关键。本文基于汽车漆膜检测的实际需求,提出了一种基于视觉图像的车身漆膜微小疵病检测方法。本方法首先对汽车漆膜图像进行多帧叠加,抑制噪声;之后利用二维小波提取图像趋势项及微小疵病的特征;最后通过局域自适应阈值和场曲优化的分割系数,实现疵病二值化分割。实验结果表明,本文方法可实现大面积图像上对 0.1 mm 以上疵病的有效检测,且微小疵病的召回率达到 97.6%,误检率为 1.3%,可达到预期检测结果。

**关键词:** 疵病检测;图像处理;微小疵病;场曲;汽车漆膜

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

## Visual image-based method for detecting minor defects in body paint

Zhang Miaomiao<sup>1,2</sup> Wang Jian<sup>1,2</sup> Gu Hao<sup>1,2</sup> Han Yan<sup>1,2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The automobile paint film may shield the body from corrosion caused by the outside environment, but because of the effect of the manufacturing process, there will be a variety of flaws when the paint is applied. Therefore, the progress of automated automotive production depends on the identification of small flaws in paint film. Based on the actual needs of automotive paint film inspection, this paper proposes a visual image-based detection method for small defects in car paint film. This method first superimposes multiple frames of automobile paint film images to suppress noise; then uses two-dimensional wavelets to extract image trend items and characteristics of minor defects; finally, through the local adaptive threshold and the optimized segmentation coefficient of field curvature, the binary segmentation of defects is realized. The experimental results show that the method in this paper can effectively detect defects larger than 0.1 mm on large-area images, and the recall rate of small defects reaches 97.6%, and the false detection rate is 1.3%, which can achieve the expected detection results.

**Keywords:** defect detection; image processing; minor defects; field curvature; automotive paintwork

## 0 引 言

现今车辆已经步入千家万户,市场对汽车工业产品的质量要求较高,尤其是针对高端市场的汽车制造商,除汽车性能外,生产商极其注重汽车车身漆膜的外观<sup>[1-2]</sup>。汽车漆膜的划痕、漆片、裂口及渣点等疵病<sup>[3]</sup>,在遇到酸性或碱性环境时,对汽车漆膜的使用寿命会造成极大的影响。目前,国内检测车身漆膜疵病多采用人工方法进行检测;通过肉眼在不同角度下观察或利用人手表面触摸等方法。人工检测方法存在检测结果受人员、工作状态等影响较大,疵病定

量结果因人而异、检测信息难以收集、检测成本高效率低,且易出现漏检和误检现象<sup>[3]</sup>。近年来,随着自动化、智能化技术的发展和汽车行业技术升级需求,基于图像视觉的汽车车身漆膜的检测受到国内汽车企业的广泛关注。

由于视觉图像的检测方法,具有检测效率高、定性、定量准确,且能够实现信息的收集,基于视觉图像的汽车漆膜疵病自动检测已经在欧美和日本等的等汽车技术发达国家和地区的部分汽车企业中开始测试和使用<sup>[4]</sup>。对于汽车漆膜疵病自动检测的检测,国外较早开展了相关技术与应用研究,2007年德国宝马在 Dingolfing 工厂对汽车漆膜疵病

收稿日期:2022-08-29

\* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(62203405)、山西省研究生教育创新项目(2022Y622)资助

检测系统进行了研究和应用测试,2007年奔驰在 Rastatt 工厂使用 ISRA VISION 公司的检测系统<sup>[5]</sup>;2011年 Kamani 等<sup>[6]</sup>针对 1 mm 以上的滴漏、剥落、砂痕、毛发、溶剂爆裂、针孔等六种疵病进行检测,1 mm 疵病的检测对于算法的要求较低;2013年福特汽车在工厂涂装线上使用了自主研发的漆膜 3D 疵病检测系统<sup>[6]</sup>;2017年 Molina 等<sup>[7]</sup>针对汽车漆膜的疵病采用图像融合算法检测疵病,对 0.3 mm 以上疵病进行检测,检出率为 85%,0.3 mm 疵病是现今检测中比较高的检测精度,但是整体检出率较低。国内仅有德国宝马汽车引进了一条包含相关检测系统的生产线。目前,国外检测系统可检出的疵病大小最小为 0.3 mm。

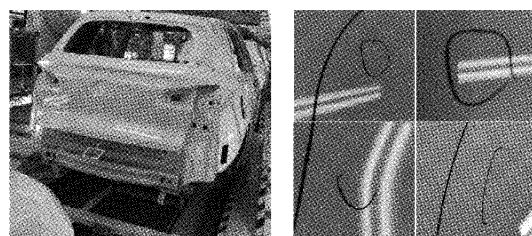
由于引进国外的检测系统的成本高,保障维护差,且受技术壁垒的制约,国内汽车企业受资金、技术的限制,国外开发的检测系统在国内生产线上的推广度较低。国内相关研究与是随我国的汽车行业发展而发展的,相对国外比较晚。2014年陈洪柱<sup>[8]</sup>采用线结构光对车身漆膜疵病进行检测,采用结构光中心线的二维图像特征,寻找疵病信息并定位,整体针对 1 mm 以上的疵病,算法检测精度还有较大的提升空间。2020年,杜超等<sup>[9]</sup>提出了一种基于频域变换的漆膜疵病检测算法,针对 0.5 mm 疵病的准确率为 95%,算法准确率较高,但是检测精度还需要进一步提升。根据我国汽车行业的发展和提升国际竞争力的需求,急需技术创新和技术自主可控,国内生产商对检测精度提出了更高要求,期望能检出 0.1 mm 的微小疵病。现今的检测算法针对 0.3 mm 及以上疵病的召回率不断提升,但是对 0.1 mm 微小疵病的检测技术发展尚不成熟,是现今的一个研究热点和难点问题,主要体现在:超高平滑度和反射度条件下大视场图像的微小疵病的检测与识别问题。

基于我国汽车行业实际需求及机器视觉检测效率高,定量定性准确等优点,本文开展了基于机器视觉的汽车漆膜微小疵病检测方法的研究,搭建了汽车漆膜疵病图像采集系统,设计了基于视觉图像的车身漆膜微小疵病检测算法,针对 0.1 mm 微小疵病的检测,预期实现 95% 以上的召回率和 5% 以下的误检率。

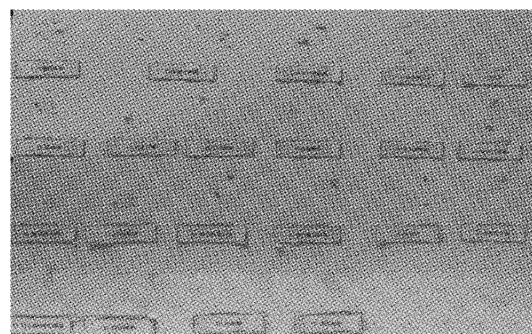
## 1 汽车漆膜图像获取系统设计

漆膜疵病大小不一,图 1(a)为生产线人工检测获取的疵病,正常环境光下疵病成像受外界影响较大。图 1(b)为生产过程中可能出现的疵病类型示意图。图像中受到环境光影响,存在过曝图像,需调整图像获取系统提高图像质量。

汽车漆膜图像获取系统的核心问题是实现超高平滑度和反射度大视场图像的高质量获取,是保障和提高检测效果的基础。涂装后的车身漆膜有着超高的平滑度和反射度,并且整体包含曲面变化,有镜面反射特性和曲面特性。在汽车生产车间的环境光下,环境光的漫反射干扰会造成



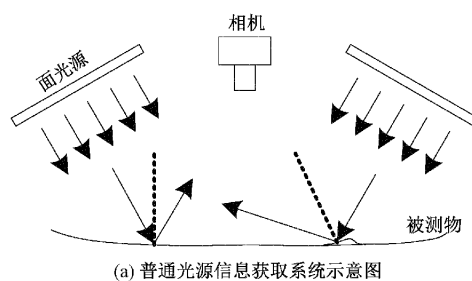
(a) 人工检测疵病结果



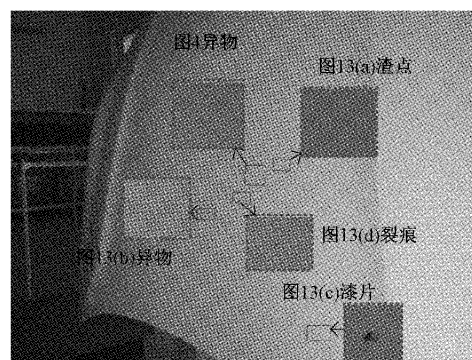
(b) 疵病类型示意图

图 1 汽车漆膜疵病图像获取环境及类型示例

图像边缘和细节模糊,疵病会造成光线的偏转<sup>[10]</sup>,影响后续微小疵病的检测。本文系统根据韩芳芳<sup>[11]</sup>对光源的研究总结,采用了高亮度的白色面光源照射汽车漆膜表面,以抑制环境光干扰,增强图像的边缘和细节信息,提高疵病成像的锐利度。目前国外的疵病检测系统多采用黑白相间的调制光源照明,调制光源可扩大疵病成像像素及对比度,抑制背景光干扰,但是调制光源成本较高,并且在处理调制光时对平滑微小疵病的影响较大,本文重点研究了普通面光源照明条件下的疵病检测系统。如图 2(a)所示。



(a) 普通光源信息获取系统示意图



(b) 被测对象实物图

图 2 图像获取系统示意图及被测物实物



图 2(a)为普通光源信息获取系统示意图,图 2(b)为被测对象实物图。被测物为汽车引擎盖缺陷考核件,引擎盖为汽车整体车身中检测精度要求最高的位置之一,其中包含图 4,图 13 中示例的疵病。汽车车身包含 5 个待测面,面积较大。通常采用分块图像采集获取全车身表面图像。为了提高检测效果,降低图像采集系统数量,期望尽可能获取大视场范围的图像。本文构建的图像采集系统由高亮度白色面光源和 Mind Visio 4701 工业相机组成。该相机具有  $8\ 240 \times 5\ 628$  像素,量化深度为 12 bit。为实现 0.1 mm 疵病的可靠成像,至少需 3~4 个像素。为了抗环境干扰,尽可能使成像系统接近于车身表面,本文选择 12 mm 焦距的广角定焦镜头,综合考虑相机、成像分辨率等因素,将成像距离设置为 500 mm,系统单次成像的视场覆盖范围  $H \times V$  为  $400\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 。

## 2 微小疵病检测

尽管上述图像采集系统抑制了环境干扰,但由于受车身曲面、反射光、相机噪声的影响,所获取的图像中,微小疵

病信息图像的对比度较低。为了相机降低量化噪声影响,图像取高 8 位数据。在被测物正前方采集图像,图 3 中的波形为正面某图像的第 3 068 行数据,由图 3 可知,采集回的图像包含奇异的疵病信息、噪声及车身曲面反射光导致图像信号的不均匀变化。因此首先需对图像进行预处理,之后进行疵病分割,图 4 为疵病检测流程。

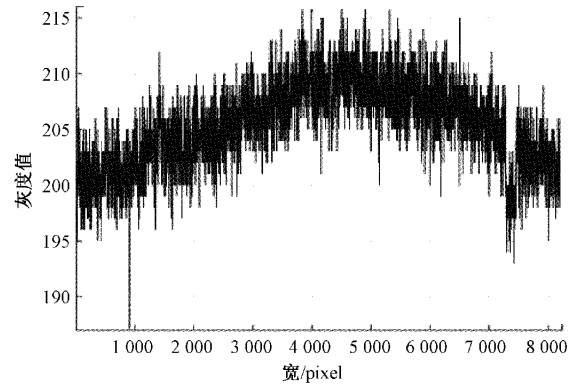


图 3 包含疵病的单行数据

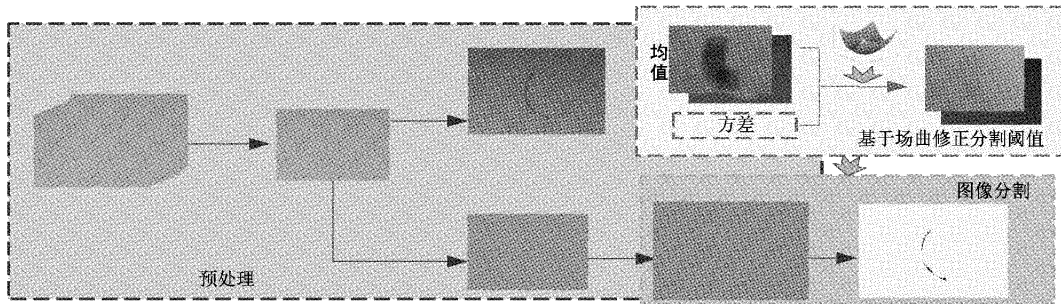


图 4 疵病检测流程

### 2.1 图像预处理

由图 3 可知,图像预处理的目的是抑制量子起伏噪声和反射光干扰噪声、剔除由曲面变化和光照引起的趋势项。为此,本文采用多帧叠加和小波变换等处理实现图像的预处理。

#### 1) 图像融合降噪

图像通过相机采集,因此会受到强度噪声的污染,其中包括照明噪声、相机热噪声等,相机噪声主要为高斯噪声,采用多张图像叠加融合抑制噪声。 $a \in R^X$ , 其中  $X$  代表了  $n$  维欧几里得空间  $R^l$ , 其中  $l = 1, 2, 3$ 。 $X = Z_m \times Z_n = \{X = (x, y) \in Z^2; 0 \leq x \leq m-1, 0 \leq y \leq n-1\}$ , 其中,  $m$  和  $n$  是图像的行数和列数。设定  $i(k) = i_k \in R^X$  是相机在  $k$  时采集到的图像,其中  $k = 0, 1, 2, \dots, M-1, M$  为获取图像的总数。

$$a = \frac{\sum_{k=0}^{M-1} i(k)}{M} \quad (1)$$

#### 2) 曲面趋势项剔除

由图 3 可知,受到被测物曲面、光照及表面污染影响,

采集图像包含趋势变化,影响后续疵病分割。因此需先剔除趋势项,由于被测物疵病大小不一,包含较大的线状或点状疵病,剔除趋势项时需分析大疵病趋势项的分离效果。本文选用 db4 小波基函数,利用二维小波变换<sup>[12]</sup>对图像趋势项提取效果进行了分析,分析结果表明,利用 4 阶 db4 小波变换能很好的提取趋势项,获得低频趋势项图像  $b \in R^X$  和细节图像  $c \in R^X$ 。本文示例图像均进行了增强处理,使其便于观察,非原始图像,图 5 为处理结果。

#### 3) 滤波器降噪

由图 5 可知,剔除趋势项后仍存在部分高频噪声,与疵病信号混杂,但噪声信号整体频率较高。因此对图像  $c$  采用巴特沃斯滤波器进行低通滤波。根据其频谱特性,设计阶数为 4,截止频率为 0.18 的滤波器,保留低通疵病信息,抑制高频噪声信息,获得增强后的疵病图像  $d \in R^X$ 。

图 6(a)和(c)为原图像及第 3 068 行波形,图 6(b)和(d)为预处理后的图像及其对应波形,由图 6 可知,经过上述预处理,噪声信号得到了很好的抑制,趋势项得到了有效剔除,疵病信号得到了凸显。

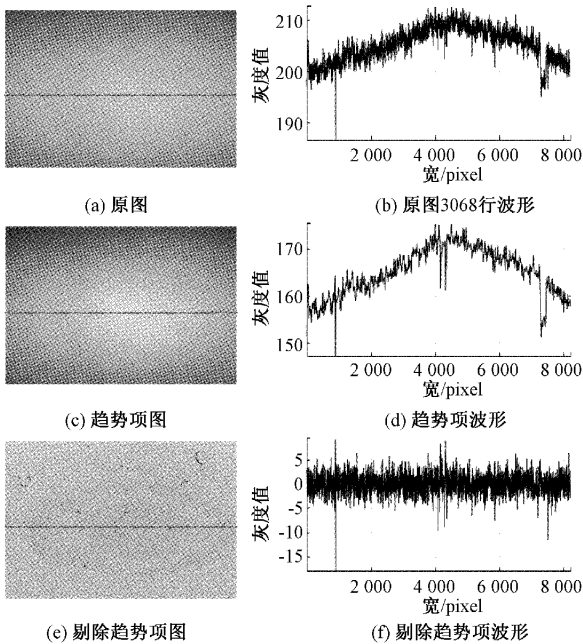


图 5 小波变换处理结果。

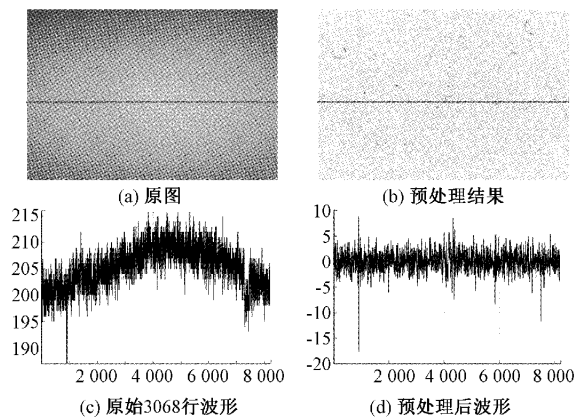


图 6 预处理结果

2.2 疵病的均值自适应阈值分割

由于疵病的大小不同,疵病边缘光散射影响,不同的大小和类型疵病的图像分割阈值也随之变化。由生产实际可知,疵病属于小概率事件。为了确定疵病分割的阈值,需了解其统计特性。本文以图 6(d)曲线为例,使用非参数密度估计法<sup>[13]</sup>得到其分布图,如图 7 所示,fit 线为正态拟合线。

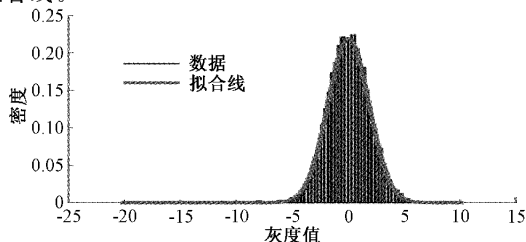


图 7 3 068 行数据的拟合图像

一个微小疵病仅占据图像的 3 个像素,图像整体包含 4 700 万个像素,疵病像素个数与图像相比属于极少数,微小疵病数据量约占总数据量的千万分之一。数据整体近似服从正态分布,图像中噪声灰度分布的相关性高,疵病信息与主体相关度较低。根据正态分布的  $3\sigma$  理论,而因此基于均值方差选择阈值  $T_H$ 。

$$T_H = \mu + k\sigma \tag{2}$$

$$\mu(x, y) = \frac{\sum_{y=y-t}^{y+t} \sum_{x=x-h}^{x+h} d(x, y)}{(2t+1)(2h+1)} \tag{3}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} (d(x, y) - \mu)^2}{m \times n} \tag{4}$$

其中,  $\mu$  为  $d$  的均值,  $\sigma^2$  为  $d$  的方差,其中  $k = 3, 4 \dots$ , 根据图像处理后疵病的成像强度和实际应用需求,采用  $k = 6$  作为基础分割系数,  $0 \leq h \leq (m-1)/2, 0 \leq t \leq (n-1)/2$ 。其中  $h$  和  $t$  取值不同时,  $\mu$  的结果不同。

$h$  和  $t$  的取值根据疵病成像大小,较大疵病的像素范围约为  $200 \times 200$ ,因此选择  $h$  和  $t$  的大小为 256 和 256,根据对应区域内疵病成像强度,调整均值。均值自适应阈值如图 8(a)所示,图 8(b)为阈值分割的疵病标记。

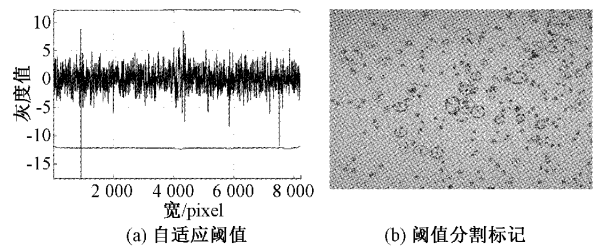


图 8 均值自适应阈值分割结果。

由图 8 可知,阈值分割结果中包含部分误检及漏检,其中黑色圈为正常检出的疵病,红色线段圈为误检,黄色点圈为漏检,分区统计漏检误检情况。图 9(a)为各区漏检个数,图 9(b)为各区误检个数,由于疵病分布不均匀,因此漏检误检分布较不稳定,但是整体上中心部分有较为明显的误检,而边缘则有较为明显的漏检现象。

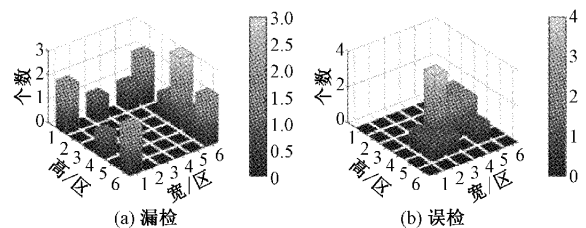


图 9 漏检及误检统计

2.3 基于场曲修正的疵病均值自适应分割阈值方法

根据上述分析,出现漏检及误检的原因主要是相同疵病在中心和边缘成像的锐利度不同,即成像系统所使用的广角镜头的场曲引起的<sup>[13]</sup>。当光学系统确定后,标定相机场曲波相差系数  $C_{220}$  就会被确定<sup>[14]</sup>,可通过图 10 的成像

模型对场曲进行分析。瞳面和像面极坐标为  $x + jy = \rho \exp(j\varphi)$  和  $x_1 + jy_1 = \rho_1 \exp(j\varphi_1)$ ,  $x_1 = x_i - \frac{z_i x_o}{z_o}$ ,  $y_1 = y_i - \frac{z_i y_o}{z_o}$ , 有  $\rho_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$  和  $\varphi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{x_1}\right)$ 。

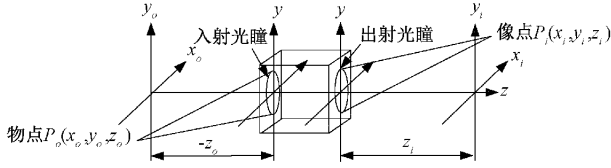


图 10 成像系统模型

对应的场曲波像差  $W(\rho_i, \rho) = C_{220} \rho_i^2 \rho^2$ , 在  $\frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_o} - \frac{1}{f_x} + C_{220} \rho_i^2 = 0$  处高斯像面上  $\rho_i = 0$  的衍射主极大为像点  $P_i$ , 仅有场曲点的光强为  $I(P_i)^{[13], [15], [16]}$ , 此时物面像面关系如式 (6)。

$$I(P_i) \cong \left[ \frac{E_o \cos \delta}{z_o R \rho_i} J_1 \left( \frac{gR}{z_i} \rho_i \right) \right]^2 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{x_i}{x_o} = \frac{y_i}{y_o} = \frac{z_i}{z_o} = \frac{\rho_i}{\rho_o} \quad (6)$$

物距  $z_o$  为定值时物面为平面, 可以通过下式计算描绘物面对应的像曲面差。

$$\begin{cases} \Delta z_i = \left( -C_{220} \rho_i^2 + \frac{1}{z_o} + \frac{1}{f_x} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{z_o} + \frac{1}{f_x} \right)^{-1} \\ \rho_i^2(x_i, y_i) = (x_i - m_o)^2 + (y_i - n_o)^2 \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 的场曲波像差系数  $C_{220}$  和对焦中心点  $(m_o, n_o)$  可通过相机内参标定确定。经过标定, 本文系统的  $C_{220} = 1.8 \mu\text{m}$ ,  $(m_o, n_o) = (4\ 212, 2\ 795)$ 。相机焦距  $f_x = 12\ \text{mm}$ , 物距  $z_o = 500\ \text{mm}$  处平面物场大小为  $(x_o, y_o) \in -20 \leq x \leq 20, -15 \leq y \leq 15$ , 由式 (7) 得像曲面方程为:

$$\Delta z_i = \left( -1.8 \times 10^{-3} \rho_i^2 + \frac{1}{500} + \frac{1}{12} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{500} + \frac{1}{12} \right)^{-1} \quad (8)$$

为了降低场曲影响, 提高检测精度, 本文通过场曲像面偏离修正分割系数  $k$ , 利用场曲  $\Delta z_i$  的曲度调整  $k$  值, 由于  $\Delta z_i$  的值过小, 对其进行适度放大, 得到  $\Delta z_i^*$ , 基于  $\Delta z_i^*$  改进分割系数  $k$ , 从而得到基于场曲修正的均值自适应阈值  $TH^*$ :

$$\begin{cases} k^* = k - \Delta z_i^* \\ TH^* = \mu + k^* \sigma \end{cases} \quad (9)$$

由图 11 可知, 场曲修正均值自适应阈值根据图像位置及对焦点调整分割系数, 提高微小疵病的召回率, 降低误检率, 使用  $TH^*$  将差分图像二值化, 得到二值化图像  $e \in R^x$ 。分割结果如图 12 所示。

$$e = \begin{cases} 1, & d(x, y) \geq TH^* \\ 0, & d(x, y) < TH^* \end{cases} \quad (10)$$

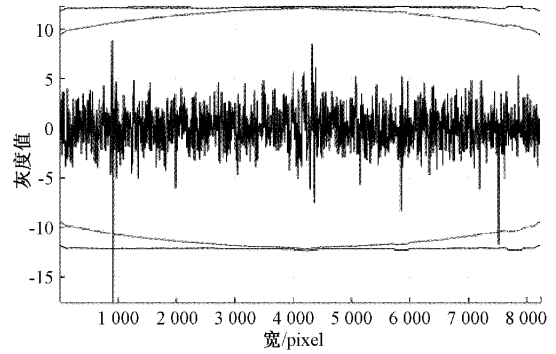


图 11 场曲修正阈值与原阈值对比

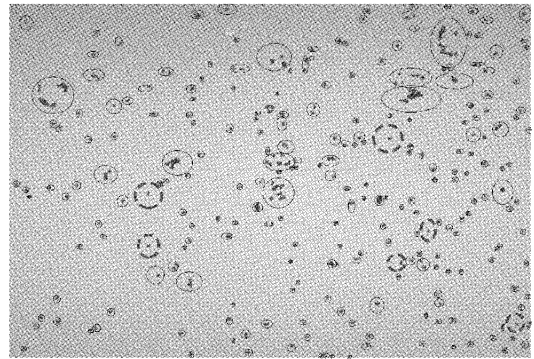


图 12 分割结果

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 评估指标及检测系统要求

为了验证本文方法性能, 使用召回率  $R_c$  (recall rate) 及误检率  $F_c$  (false positive) 综合评价缺陷检测结果, 定义如式 (11)。

$$\begin{cases} R_c = \frac{T_p}{T_p + T_N} \times 100\% \\ F_c = \frac{F_p}{T_p + F_p} \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

$T_p$  为正确检出个数,  $F_p$  为错误检出个数,  $T_N$  为未检出个数。

车身不同部位对于疵病检测精度的要求不同, 例如对汽车引擎盖等明显位置的检测精度要求较高, 对于汽车顶部、尾部等非直视位置的检测要求略低。因此针对疵病大小及生产实际需求, 根据疵病大小将检测等级分为 S 级、A 级、B 级, 分级明细如表 1 所示。

表 1 疵病检测分级标准

	S 级	A 级	B 级
检测精度	$\geq 0.1\ \text{mm}$	$\geq 0.3\ \text{mm}$	$\geq 0.7\ \text{mm}$
$R_c$	$> 95\%$	$> 97\%$	$> 99\%$
$F_c$	$< 5\%$	$< 5\%$	$< 5\%$



为了满足实际生产中对检测等级的需求,利用分割系数 $k$ 对检测精度的影响,调整分割系数完成检测的分级需求。

### 3.2 检测结果分析

为了检验本文方法检测的有效性,对某汽车厂提供的引擎盖缺陷考核件进行了人工检测对比,疵病类型包括渣点、异物、漆片、裂痕等,疵病大小为 $0.1\sim 10\text{ mm}$ ,为疵病某一维度的尺寸,不同类型疵病示例及各等级分割结果如图13所示。

不同分级下对不同大小疵病的分割效果不同,整体分级标准符合表1,针对不同分级统计缺陷检测结果,由表2可知。

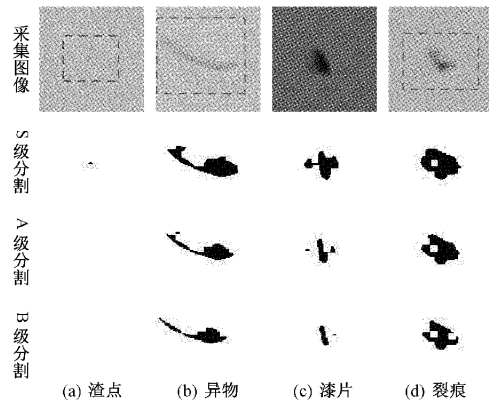


图13 分割结果

表2 分级标准及检测方法对比

缺陷尺寸	机器视觉检测结果						人工检测结果	
	S级( $k=6$ )		A级( $k=7.5$ )		B级( $k=9$ )		$R_c$	$F_c$
	$R_c$	$F_c$	$R_c$	$F_c$	$R_c$	$F_c$		
0.1 mm	95.89%	3.45%	—	—	—	—		
0.3 mm	97.91%	0.00%	97.91%	0.00%	—	—	92.41%	0.00%
0.7 mm	99.30%	0.00%	99.30%	0.00%	99.30%	0.00%		

机器视觉检测与人工检测相比召回率高,人工检测误检率较低,但难以对检出疵病进行定量分析。机器检测可针对不同等级的检测需求调整分割系数,满足各等级对召回率及误检率的要求。

对本文方法及文献[7]、[9]方法的检测结果比较如表3,本文方法对微小疵病具有较好的检测效果。

表3 三种方法检测结果对比

	文献[7]	文献[9]	本文方法
检测精度	0.3 mm	0.5 mm	0.1 mm
$R_c$	87%	89.23%	97.66%
$F_c$	15%	4.99%	1.30%

## 4 结 论

针对汽车漆膜超平滑高反射的特点,本文方法采用普通白色面光源替代黑白调制光源照射的汽车漆膜检测,通过预处理实现了背景光抑制,采用场曲校正和自适应区域变均值阈值分割实现了疵病的有效分割。通过对多组图像中764个微小疵病检测结果的统计,针对 $0.1\text{ mm}$ 及以上所有疵病(S级分割)的召回率为95.8%,误检率为3.45%, $0.3\text{ mm}$ 及以上疵病(A级分割)的召回率为97.9%, $0.7$ 及以上疵病(B级分割)的召回率为99.3%。综合召回率为97.6%,误检率为1.3%,达到预期召回率为95%以上,误检率小于5%的目标,可满足汽车生产漆膜高精度、定量自动检测的要求。

## 参考文献

- [1] ZHANG J D, YIN X L, LUAN J, et al. An improved vehicle panoramic image generation algorithm [J]. Multimedia tools and applications, 2019, 78 (19): 27663-27682.
- [2] YIN X L, ZHANG J D, WU X G, et al. An improved lane departure warning algorithm based on fusion of F-Kalman filter and F-TLC[J]. Multimedia tools and applications, 2019, 78(9): 12203-12222.
- [3] 赵健,付琴. 基于机器视觉的汽车漆面缺陷检测技术[J]. 汽车工艺与材料, 2022(7): 16-19.
- [4] 刘赫,林宜乐. 汽车涂装表面质量自动检测技术及应用[J]. 现代涂料与涂装, 2020, 23(5): 42-44.
- [5] 孔飞,张川,冯日华,等. 汽车车身漆膜缺陷自动检测系统[J]. 现代涂料与涂装, 2017, 20(3): 57-61.
- [6] KAMANI P, AFSHAR A, TOWHIDKHAH F, et al. Car body paint defect inspection using rotation invariant measure of the local variance and one-against-all support vector machine [C]. 2011 First International Conference on Informatics and Computational Intelligence, 2011: 244-249.
- [7] MOLINA J, ERNESTO SOLANES J, ARNAL L, et al. On the detection of defects on specular car body surfaces [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing: An International Journal of Manufacturing and Product and Process Development, 2017, 48: 263-278.

- [8] 陈洪柱. 基于线结构光的车身漆膜缺陷检测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [9] 杜超, 刘桂华. 一种基于频域变换的无监督车身漆膜缺陷检测算法[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(6): 344-351.
- [10] 张聪聪, 牟莉. 基于机器视觉的图像边缘检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 80-85.
- [11] 韩芳芳. 表面缺陷视觉在线检测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] 向江华, 刘缠牢. 基于多光谱图像融合的光学表面疵病检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 131-135.
- [13] 朱杨, 张帆, 宋莹, 等. 用于高精度卫星姿态测量的大相对孔径高杂光抑制比星敏传感器光学设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 1-9.
- [14] 焦传佳, 江明. 基于 AprilTag 图像识别的移动机器人定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 110-119.
- [15] 吴波, 常山, 项金冬. 基于衍射机制数码成像中场曲标定及其像素像点的校正[J]. 激光杂志, 2014, 35(3): 51-52.
- [16] 吴波, 常山, 柳仕飞. 基于场曲的物像间曲直面的换算及其应用[J]. 工具技术, 2014, 48(8): 129-131.

### 作者简介

张苗苗, 硕士, 主要研究方向为无损检测、图像处理与识别等。

E-mail: 1157542269@qq.com

王鉴, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: 9036944@qq.com

顾灏, 工学博士, 主要研究方向为图像处理、智能信息处理。

E-mail: 526620682@qq.com

韩焱, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无损检测、信息探测、智能信息处理、图像处理等。

E-mail: hanyan@nuc.edu.cn