

文章编号 1004-924X(2010)10-2288-09

# 强反射表面缺陷图像预处理

杨永敏, 樊继壮, 赵 杰

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了校正强反射表面图像的亮度不均匀性, 抑制局部强亮度现象, 同时使其保留足够多的原始图像信息, 研究了强反射表面缺陷图像的预处理方法。分析了强反射表面的光学特性, 研究了偏微分方程理论及同态滤波算法, 在此基础上提出了一种基于偏微分方程的同态滤波算法, 即采用热传导方程滤波算子对同态分解的图像进行处理。引入信息熵对不同尺度参数下的处理效果进行评价, 从而确定热传导同态滤波的尺度参数, 并将该算法与背景去除法、基于小波的同态滤波算法进行了比较。对比实验表明, 采用提出的算法处理后得到的图像其灰度级均匀分布在 1~6 之间, 信息熵值均在 91% 以上。该方法校正了图像亮度的不均匀性, 提高了图像质量, 同时能保留足够多的原始图像信息。

**关键词:** 强反射表面; 缺陷图像; 图像预处理; 偏微分方程; 同态滤波

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2288

## Preprocessing for highly reflective surface defect image

YANG Yong-min, FAN Ji-zhuang, ZHAO Jie

(State Key Laboratory of Robotics and System,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to modify the luminance heterogeneity of a highly reflective surface image, restrain the phenomenon of local high luminance and to preserve enough original image information, a preprocessing method for highly reflective surface defect image is investigated and the optical characteristics of a highly reflective surface are analyzed by using Partial Differential Equation (PDE) theory and homomorphic filtering algorithms. A homomorphic filtering algorithm based on the PDE is proposed which uses the heat conduction equation filtering operator to process homomorphic decomposition images. The comentropy is induced to evaluate the processing effect in different dimension parameters, then the dimension parameter of heat conduction homomorphic filtering is determined. The algorithm is contrasted with the background subtraction algorithm and wavelet homostasis filtering algorithm, and the experiment indicates that the image processed by the proposed algorithm has the gray-level values distributed uniformly between 1~6 and a high comentropy value above 91%. This method modifies the image luminance heterogeneity, improves image quality and preserves sufficient original image information.

**Key words:** highly reflective surface; defect image; image preprocessing; Partial Differential Equation (PDE); homomorphic filtering

收稿日期: 2009-12-11; 修订日期: 2010-03-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA041501); 国家重大科技专项课题资助项目 (No. 2009ZX04004-062)

## 1 引言

在基于机器视觉表面缺陷检测系统的应用中,在对强反射表面进行缺陷检测时,强反射光给有表面缺陷的图像处理带来了很大的影响<sup>[1-2]</sup>。例如在对钢板表面缺陷进行检测的时候,由于钢板表面反射能力极强,因此在某些缺陷(如横折印、纵折印、褶皱等)发生的情况下,会在钢板局部产生极强反射光,从而对摄像机成像以及后续的各种图像处理分析造成了很大的影响,最终会导致表面缺陷检测中出现缺陷误判、漏判,从而影响了产品品质以及竞争力的提升,降低了检测系统的效率和性能。因此,对缺陷图像进行预处理<sup>[3-4]</sup>,对强反射表面造成的图像亮度不均匀性进行校正很有必要。

图像预处理的目的是既要提高图像质量又要保留足够多的图像信息,以便于后续的各种图像处理分析。校正图像亮度不均匀性就是要尽量削减入射光分量的影响,即压制图像的低频分量;同时又要增强物体的反射光分量,即放大图像的高频分量。经过这些处理后,既能够压制图像的动态范围同时又可增强图像的对比度,从而达到校正图像亮度不均匀性的目的。

传统的校正方法,如背景去除法,虽改善了图像的亮度不均匀性,但在处理过程中损失了大量的图像信息,对后续进行的图像分析工作造成了影响。为了解决这一问题,人们提出了同态滤波算法以及基于同态滤波的各种改进算法<sup>[5-8]</sup>,如小波同态滤波法等。传统的同态滤波属于频率域图像增强算法,其采用的傅里叶变换具有较高的频域分辨率和较低的空间分辨率,从图像整体角度对光照不均匀进行修正,可很好地保持了图像的原始面貌,但该方法没有充分考虑图像空间域局部特征,在局部对比度增强效果上不能令人满意。而基于小波的同态滤波方法虽然同时考虑了频域和空间域特征,保留了相对较多的图像信息,但这种方法需要进行多级小波变换,导致了计算量大、实时性差<sup>[9-10]</sup>。综合这些因素,本文采用了基于偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)的同态滤波方法,有效地避免了上述问题。

## 2 强发射表面的光学特性分析

图像  $f(x, y)$  是由光源产生的照度场  $f_i(x, y)$  和目标反射场系数  $f_r(x, y)$  共同作用产生,关系如下:

$$f(x, y) = f_i(x, y) \cdot f_r(x, y), \quad (1)$$

图像中像素的亮度取决于这两种因素共同作用的结果。不同光源会产生不同的照度场,而反射场与不同的物体表面有着直接关系。当被测工件为漫反射体时,其表面固定点的明暗程度不会随观察位置改变而改变,在这种情况下,采集到的图像背景灰度均匀,物体边缘突出,便于检测和处理。理想漫反射表面反射光强分布可表示为:

$$I_\theta = I_N \cos \theta, \quad (2)$$

其中:  $I_N$  为反射体表面法线方向的反光强度,  $I_\theta$  为与法线方向成  $\theta$  角方向的反光强度。理想漫反射表面漫反射光线强度分布如图 1 所示。

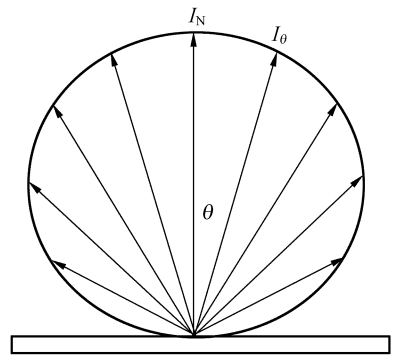


图 1 理想漫反射表面反射光强分布

Fig. 1 Reflection intensity distribution of ideal diffusion reflection surface

当被测工件为钢板时,其表面为光滑的金属表面并不是理想的漫反射体,图 2 为非理想漫反射体光强度分布图。钢板表面反射属于镜面反射,采用一般的照明方法很难完成任务,需要采用可以产生均匀散射光的漫反射主动光源,降低钢板表面镜面反射效应来提高表面缺陷的显现力。

但是由于钢板表面缺陷几何形状复杂、种类多,虽然采用了均匀散射光源,也不能够完全避免镜面反射的产生。当产生横折印、纵折印、褶皱等缺陷时,会在钢板的局部产生镜面反射现象,由此

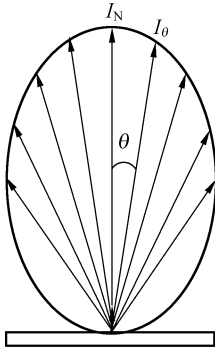


图 2 非理想漫反射表面反射光强分布

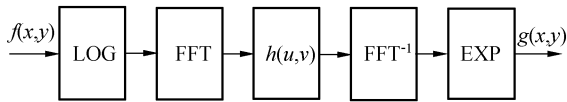
Fig. 2 Reflection intensity distribution of unideal diffusion reflection surface

产生的强反射光会影响到检测系统对缺陷的检测精度。

### 3 强反射表面图像预处理

#### 3.1 基于偏微分方程的同态滤波

同态滤波处理步骤如图 3 所示：



LOG: 对数运算; FFT: 傅里叶变换;  $h(u, v)$ : 滤波器;  $\text{FFT}^{-1}$ : 傅里叶逆变换; EXP: 指数运算;  $f(x, y)$ : 原始图像;  $g(x, y)$ : 处理后输出图像

图 3 同态滤波原理框图

Fig. 3 Homomorphic smoothing functional diagram

传统同态滤波选择  $h(u, v)$  时, 一般选择线性高通滤波器, 这一类型的滤波函数在适当的参数作用下, 可以使图像的对比度有所提高, 但是无法有效抑制图像的强亮度区域<sup>[11]</sup>。

在这里引入基于 PDE 的图像处理方法, 这种处理方法与其它滤波方法相比有较好的稳定性、较好的处理效果, 在图像处理中占有很大的优势<sup>[12-14]</sup>。PDE 中的热传导方程可以定义为: 在  $\mathbf{R}$  中,  $\Omega \subset \mathbf{R}^2$  上的一个函数  $u$  有

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u(x, 0) = u_0(x) \end{cases} \quad (3)$$

该方程的解函数  $u$  描述了在各向同性的介质中热量随着时间  $t$  的传播。将热传导方程应用到图像处理领域, 函数  $u$  用图像函数  $f(x, y, t)$  取

代,  $t$  不再表示时间, 而是一个尺度参量。可以得到图像的热传导滤波方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} = \Delta f(x, y, t) \\ f(x, y, 0) = f_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta f(x, y, t)$  为图像的拉普拉斯算子, 其初始解为  $f(x, y, 0)$ ;  $f(x, y, 0)$  为初始灰度图像;  $f(x, y, t)$  为在  $t$  时的平滑图像。

使用热传导方程进行图像滤波处理时, 通常采用方程的数值解, 并不要求出方程的解析解。在工程应用中, 可以采用有限差分的方法对热传导方程进行离散化处理<sup>[15]</sup>。对式(4)做如下变形:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_t - f_0}{t} = \Delta f \quad (5)$$

由此, 针对每个像素可以得出:

$$(f_t)_{i,j} = (f_0)_{i,j} + t(\Delta f_t) \quad (6)$$

其中:  $(\Delta f_t)_{i,j} = (f_{xx})_{i,j} + (f_{yy})_{i,j} = ((f_x)_x)_{i,j} + ((f_y)_y)_{i,j}$

下面以  $(f_x)_{i,j}$  和  $(f_{xx})_{i,j}$  的差分结果为例来说明有限差分法:

$$(f_x)_{i,j} = \frac{2(f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) + f_{i+1,j+1} - f_{i-1,j+1} + f_{i+1,j-1} - f_{i-1,j-1}}{4} \quad (7)$$

$$(f_{xx})_{i,j} = \frac{2((f_x)_{i+1,j} - (f_x)_{i-1,j}) + (f_x)_{i+1,j+1} - (f_x)_{i-1,j+1} - (f_x)_{i+1,j-1} + (f_x)_{i-1,j-1}}{4} \quad (8)$$

$(f_y)_{i,j}$  与  $(f_{yy})_{i,j}$  的形式与式(7)和(8)类似。由此可得到热传导方程滤波算子。

从式(6)中可知, 选取不同尺度参数, 可得到各个尺度参数之下的滤波结果。图 4 和 5 所示为对应不同尺度参数时, 钢板表面横折印和纵折印缺陷图像的处理结果。采用这种方法来改善图像的质量, 在一定程度上会造成图像信息的损失, 因此, 在这里引入信息熵来评价不同尺度参数时的处理效果。

信息论中信息熵的定义为: 设图像的灰度级集合为  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , 对应的概率分别为  $p_1 = p(\alpha_1)$ ,  $p_2 = p(\alpha_2)$ ,  $\dots$ ,  $p_n = p(\alpha_n)$ , 每一级灰度所具有的信息量分别为  $\log_2(\frac{1}{p_1})$ ,  $\log_2(\frac{1}{p_2})$ ,  $\dots$ , 则其平均信息量  $H$  为:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i (\log_2 \frac{1}{p_i}) = - \sum_{i=1}^n p_i (\log_2 p_i), \quad (9)$$

数字图像的熵  $H$  表示其各个灰度级比特数的统

计平均值,可以用来表示处理后的图像包含原图像的程度。

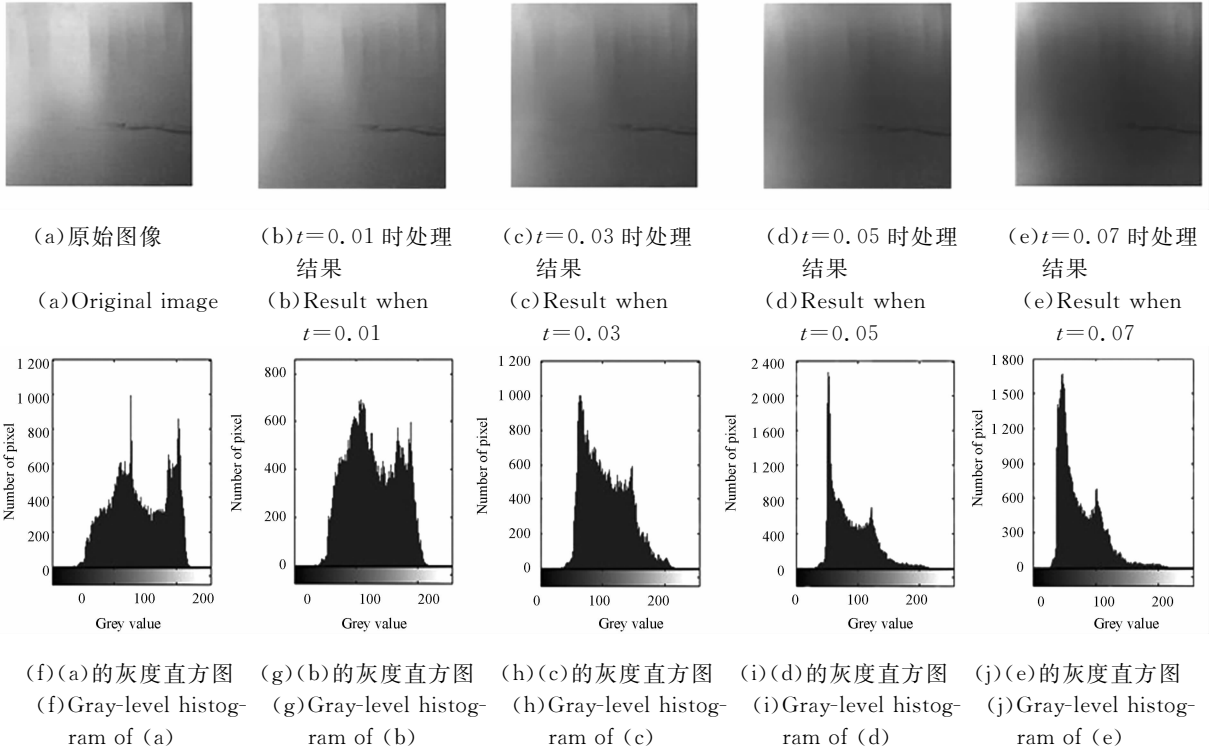


图 4 横折印缺陷图像的处理结果及对应的灰度直方图

Fig. 4 Image-processing results and corresponding gray-level histogram of transversal pincher defect

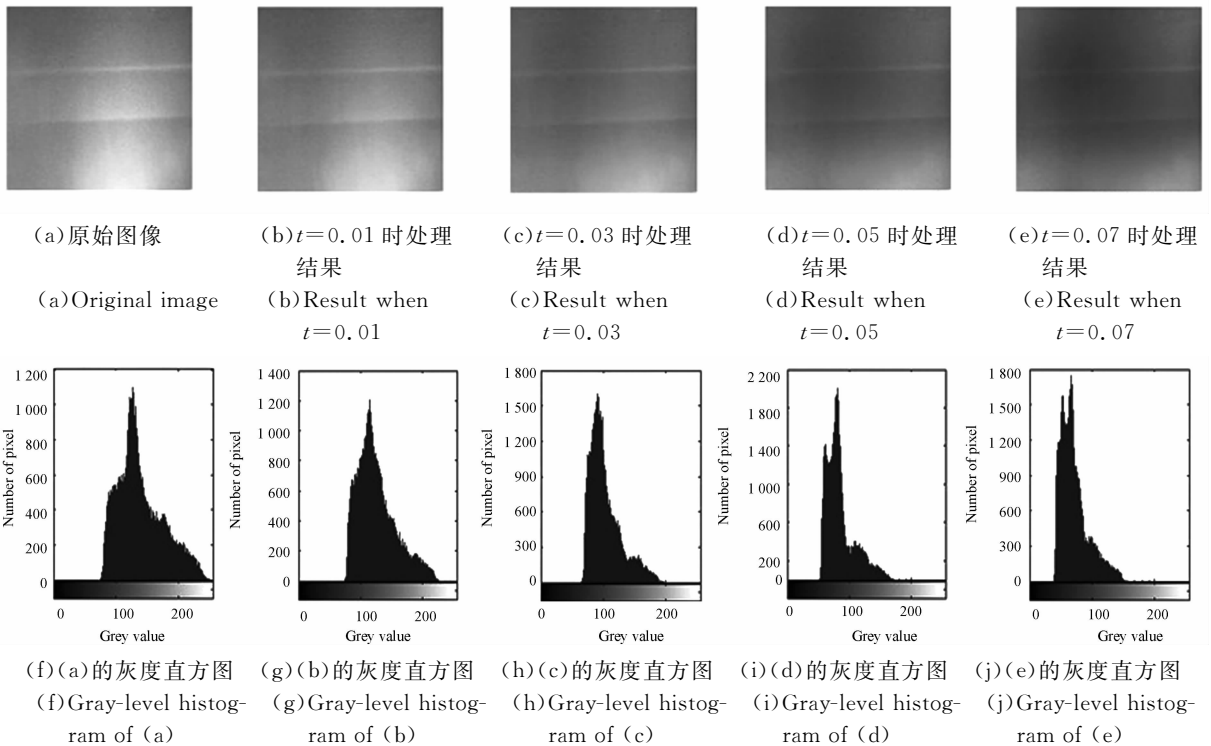


图 5 纵折印缺陷图像的处理结果及对应的灰度直方图

Fig. 5 Image-processing results and corresponding gray-level histogram of longitudinal pincher defect

表 1 横折印缺陷图像处理结果的信息熵比较

Tab. 1 Comentropy comparison of transversal pincher defect image-processing results

	(a)原始图像	(b) $t=0.01$ 时处理结果	(c) $t=0.03$ 时处理结果	(d) $t=0.05$ 时处理结果	(e) $t=0.07$ 时处理结果
信息熵	7.274 2	7.216 8	6.992 9	6.789 9	6.519 0
百分比	100%	99.21%	96.12%	93.34%	89.62%

表 2 纵折印缺陷图像处理结果的信息熵比较

Tab. 2 Comentropy comparison of longitudinal pincher defect image-processing results

	(a)原始图像	(b) $t=0.01$ 时处理结果	(c) $t=0.03$ 时处理结果	(d) $t=0.05$ 时处理结果	(e) $t=0.07$ 时处理结果
信息熵	7.075 6	6.813 3	6.584 5	6.455 8	6.218 6
百分比	100%	96.30%	93.06%	91.22%	87.89%

图 4、5 分别为横折印与纵折印缺陷图像的处理结果和对应的灰度直方图,表 1、2 为这两种缺陷图像处理结果的信息熵比较。综合图 4、5 与表 1、2 可以看出,当尺度参数  $t=0.03$  时,缺陷图像的局部强亮度开始得到抑制,随着  $t$  值的增加,缺陷图像的灰度趋于均匀。同时,随着  $t$  值的增加,相应的信息熵值逐渐减小,图像的信息损失程度逐渐严重。当  $t$  值  $>0.05$  时,从相应的图像处理结果信息熵比较表中可以看到原始图像的信息有了很大的损失。综合比较各个尺度参数的滤波结

果与对应的信息熵结果可见,当滤波尺度  $t=0.05$  时,两种缺陷的局部强亮度得到了抑制,同时其对应的信息熵值相对较高,保留了相对多的原始图像信息。因此,在后续的实验,采用尺度参数  $t=0.05$  作为热传导方程同态滤波的尺度参数。

### 3.2 实验分析

本文针对钢板表面缺陷中的横折印、纵折印、褶皱等缺陷图像,采用了背景去除法、基于小波的同态滤波算法和基于偏微分方程的同态滤波算法对这 3 种缺陷图像进行处理,其结果如图 6~8 所示。

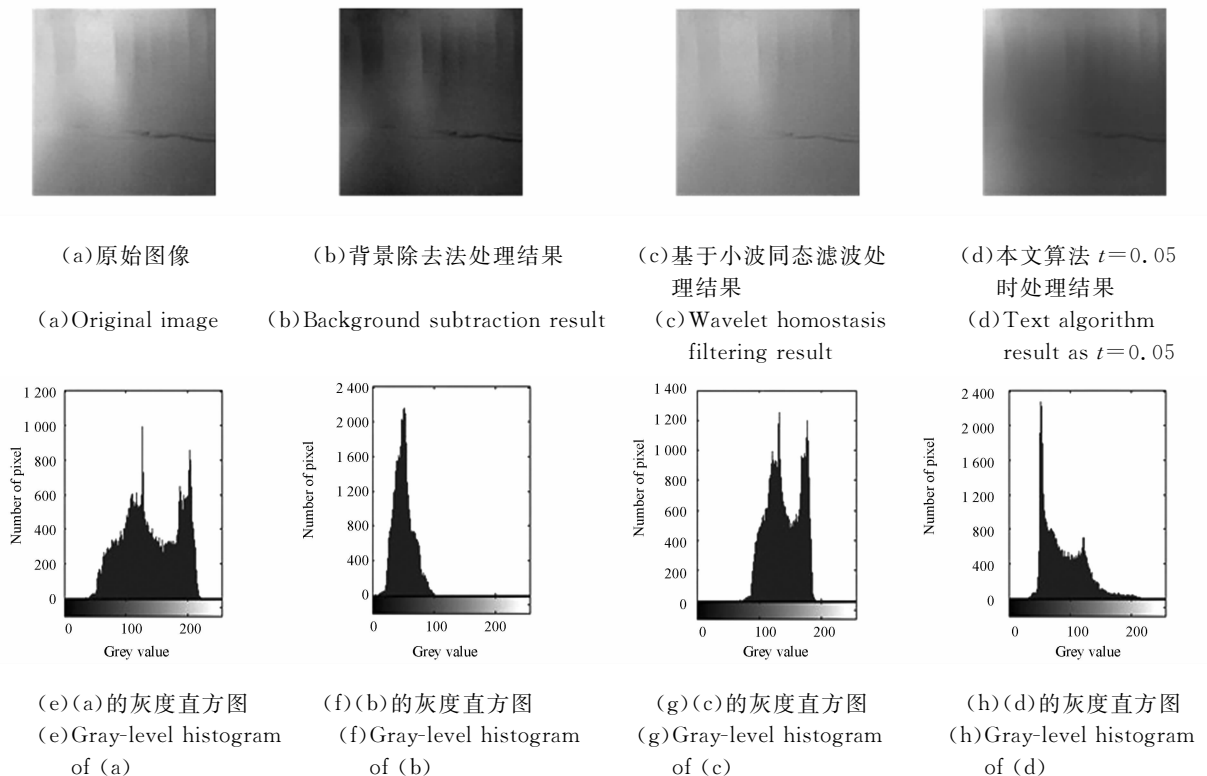
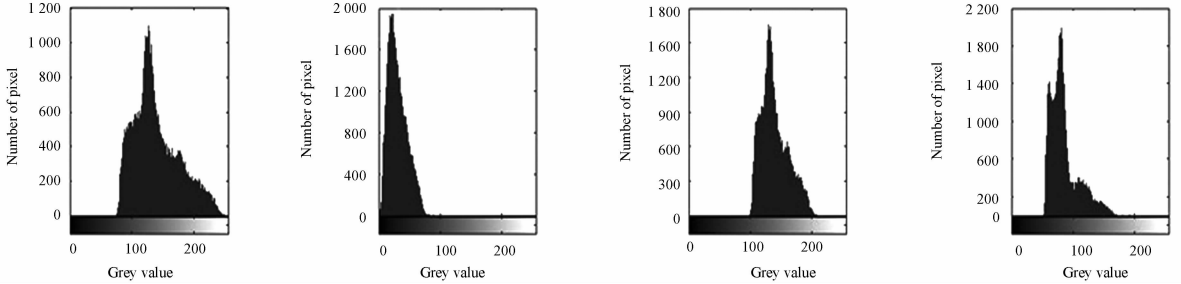


图 6 不同方法处理横折印缺陷图像的结果及灰度直方图

Fig. 6 Results from different image-processing methods and their gray-level histograms for transversal pincher defect



(a)原始图像 (b)背景除去法处理结果 (c)基于小波同态滤波处理结果 (d)本文算法  $t=0.05$  时处理结果  
 (a)Original image (b)Background subtraction result (c)Wavelet homostasis filtering result (d)Text algorithm result as  $t=0.05$



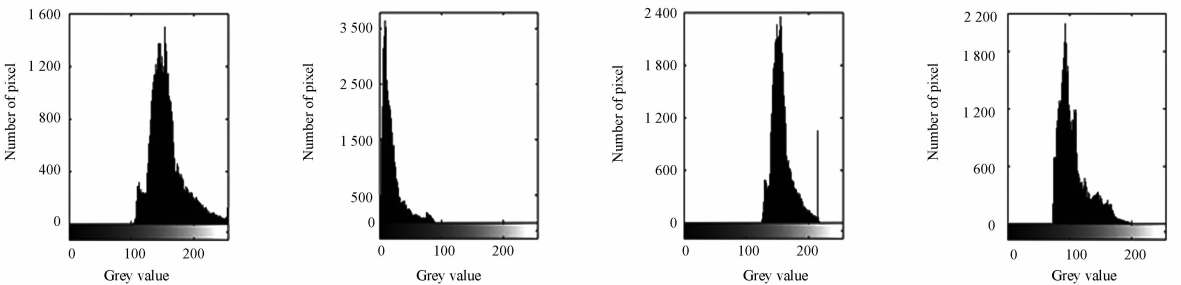
(e)(a)的灰度直方图 (f)(b)的灰度直方图 (g)(c)的灰度直方图 (h)(d)的灰度直方图  
 (e)Gray-level histogram of (a) (f)Gray-level histogram of (b) (g)Gray-level histogram of (c) (h)Gray-level histogram of (d)

图 7 不同方法处理纵折印缺陷图像的结果及灰度直方图

Fig. 7 Results from different image-processing methods and their gray-level histograms of longitudinal pincher defect



(a)原始图像 (b)背景除去法处理结果 (c)基于小波同态滤波处理结果 (d)本文算法  $t=0.05$  时处理结果  
 (a)Original image (b)Background subtraction result (c)Wavelet homostasis filtering result (d)Text algorithm result as  $t=0.05$



(e)(a)的灰度直方图 (f)(b)的灰度直方图 (g)(c)的灰度直方图 (h)(d)的灰度直方图  
 (e)Gray-level histogram of (a) (f)Gray-level histogram of (b) (g)Gray-level histogram of (c) (h)Gray-level histogram of (d)

图 8 不同方法处理褶皱缺陷图像的结果及灰度直方图

Fig. 8 Results from different image-processing methods and their gray-level histograms of wrinkle defect

在图 6~图 8 中,子图(b)为背景去除法处理的结果,由于采用不同邻域的背景去除法,所得到的结果会有所差异,经过对多个不同大小邻域的处理结果比较,在图 6(b)中采用的是  $128 \times 128$  邻域的背景去除法得到的结果,而得到图 7(b)和图 8(b)处理结果的邻域大小为  $64 \times 64$ ,对应的子图(f)为其灰度直方图。子图(c)与子图(g)为基于 Harr 小波的同态滤波算法的处理结果及对应的灰度直方图。子图(d)与(h)为本文算子处理结果及对应的灰度直方图。

观察采用背景去除法得到的结果,虽然 3 种缺陷图像的局部强亮度得到了抑制,但是整体效果不佳,而且从表 3、4、5 中对应信息熵值可以看

表 3 不同方法处理横折印缺陷图像结果的信息熵比较

Tab. 3 Comentropy comparison of transversal pincher defect image-processing results with different methods

	图 6(a)	图 6(b)	图 6(c)	图 6(d)
信息熵	7.274 2	5.886 0	6.552 0	6.789 9
百分比	100%	80.92%	90.07%	93.34%

表 4 不同方法处理纵折印缺陷图像结果的信息熵比较

Tab. 4 Comentropy comparison of longitudinal pincher defect image-processing results with different methods

	图 7(a)	图 7(b)	图 7(c)	图 7(d)
信息熵	7.075 6	5.851 2	6.354 5	6.455 8
百分比	100%	82.69%	89.81%	91.22%

表 6 缺陷处理结果的灰度级分布

Tab. 6 Gray-level distribution of defect processed results

缺陷类型	横折印缺陷				纵折印缺陷				褶皱缺陷			
	原始图像	背景去除法	小波同态滤波	本文设计算法	原始图像	背景去除法	小波同态滤波	本文设计算法	原始图像	背景去除法	小波同态滤波	本文设计算法
0	0.000 0	0.002 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.240 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.619 4	0.000 0	0.000 0
1	0.005 9	0.647 7	0.000 0	0.174 4	0.000 0	0.671 8	0.000 0	0.002 4	0.000 0	0.326 7	0.000 0	0.003 4
2	0.150 4	0.342 5	0.006 3	0.432 1	0.070 8	0.087 8	0.000 0	0.636 2	0.000 0	0.053 9	0.000 0	0.290 1
3	0.284 3	0.006 9	0.344 4	0.272 5	0.368 4	0.000 0	0.329 9	0.190 9	0.080 0	0.000 0	0.002 1	0.525 3
4	0.204 3	0.000 0	0.363 2	0.096 7	0.312 7	0.000 0	0.511 3	0.163 9	0.615 5	0.000 0	0.747 4	0.141 9
5	0.241 2	0.000 0	0.252 1	0.021 2	0.165 6	0.000 0	0.157 5	0.006 6	0.210 3	0.000 0	0.214 6	0.032 7
6	0.113 9	0.000 0	0.034 0	0.003 1	0.079 0	0.000 0	0.001 2	0.000 0	0.064 5	0.000 0	0.035 8	0.006 6
7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.003 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.028 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0

从表 6 中图像灰度分布中可以看出,采用背景去除法处理得到的结果,其灰度概率大多分布

表 5 不同方法处理褶皱缺陷图像结果的信息熵比较

Tab. 5 Comentropy comparison of wrinkle defect image-processing results with different methods

	图 8(a)	图 8(b)	图 8(c)	图 8(d)
信息熵	6.589 8	5.502 6	5.916 2	6.275 5
百分比	100%	83.50%	89.78%	95.23%

到这种方法处理后的图像,信息熵比较低,包含原图像信息少。基于小波的同态滤波方法的处理结果,图像的强亮度得到了抑制,信息熵值相对于背景去除法高,但在进行多级小波分解时计算量比较大,耗时比较长。对于本文提出的方法,从其处理结果和相应的信息熵值可以看出,在缺陷图像的强亮度得到抑制的同时,有具有相对较高的信息熵值。下面对 3 种缺陷通过不同算法的处理结果分析其图像灰度值的统计特性,从而进一步说明每一种处理方法对局部强反射光的抑制情况。引入概率密度函数  $p_r(r_k)$  来表示图像的灰度级分布,其离散形式可以表示为:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}, \quad (10)$$

式中: $r_k$  表示离散灰度级; $n_k$  为属于  $r_k$  灰度级的像素数量; $n$  是图像中的总像素数。表 6 为将像素灰度等级分为 8 个等级,3 种缺陷的原图像和处理后的图像的灰度分布情况,其中 0 级灰度代表灰度值区间为  $[0, 31]$ ,其余灰度等级代表灰度区间值依次类推。

在低灰度级,这直接导致了其处理后的图像偏暗,产生了过渡抑制局部强反射的现象,损失了过多

图像信息。而基于小波同态滤波算法得到的结果,其灰度又大多分布于高灰度级部分,说明其对局部强反射的抑制不彻底,使处理后的图像中仍然存在局部强反射现象。基于本文算法的处理结果,其灰度分布于灰度级 1~6 之间,分布相对比较均匀,同时中间灰度级的分布概率又比较大,没有发生过渡抑制或者抑制不彻底的情况。因此,经过试验比较可知,基于偏微分方程的同态滤波算法,可以在抑制图像局部强亮度的同时,保留更多的图像信息,适合于强反射表面缺陷图像的预处理。

## 4 结 论

本文根据强反射表面给机器视觉表面缺陷检

测系统带来的问题,研究了强反射表面的光学特性,分析了钢板表面缺陷图像出现局部强反射的情况。在此基础上研究了同态滤波理论以及基于偏微分方程的图像处理方法,提出了基于偏微分方程的同态滤波算法。同时,针对钢板表面缺陷中的横折印、纵折印和褶皱缺陷进行了算法对比实验。实验结果表明,本文算法有效地抑制了表面缺陷图像局部强亮度现象,使其灰度均匀分布在灰度级 1~6 之间,同时又保留了 91% 以上的原始图像信息,达到了理想的处理效果。由此可见基于偏微分方程的同态滤波算法更加适合强反射表面图像预处理,既提高了图像质量又保留了足够多的原始图像信息。

## 参考文献:

- [1] 曲兴华,何滢,韩峰,等. 强反射表面缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报,2003,23(5):547-551.  
QU X H, HE Y, HAN F, *et al.*. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003,23(5):547-551. (in Chinese)
- [2] FRANZ P, PAUL O L. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces [J]. *NDT&E International*, 2003, 36(8):609-617.
- [3] YANG C C. Improving the sharpness of an image with non-uniform illumination [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005,37(3):235-238.
- [4] 曲兴华,宫辉,贾果欣. 数码相机的彩色图像预处理过程[J]. 光学精密工程,2009,17(1):207-212.  
QU X H, GONG H, JIA G X. Preprocessing of color image based on digital camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):207-212. (in Chinese)
- [5] 崔长彩,张耕培,张彬,等. 小波滤波及奇异性分析在表面形貌评定中的应用[J]. 光学精密工程,2009,17(9):2255-2261.  
CUI CH C, ZHANG G P, ZHANG B, *et al.*. Application of wavelet filtering and singularity analysis to evaluation of surface roughness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2256-2261. (in Chinese)
- [6] 郭贵法,汪仁煌,王欢. 改进的同态滤波在指针式仪表图像预处理中的应用[J]. 广东工业大学学报,2009,26(3):57-59.  
GUO G F, WANG R H, WANG H. A pretreatment of image based on reformative homomorphic filtering [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2009,26(3):57-59. (in Chinese)
- [7] 江洁,费金城,王颖,等. 昆虫翅膀运动变形测量中的图像特征提取[J]. 光学精密工程,2007,15(10):1616-1621.  
JIANG J, FEI J E, WANG Y, *et al.*. Image feature extraction in insect kinetic deformation measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10):1616-1621. (in Chinese)
- [8] 孙慧贤,罗飞路,张玉华. 工业内窥镜图像对比度增强算法[J]. 光电工程,2008,35(12):107-111.  
SUN H X, LUO F L, ZHANG Y H. Novel contrast enhancement method for industrial endoscope images [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,35(12):107-111. (in Chinese)
- [9] CAO W P, CHE R S, YE D. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform for non-uniform

- weak illumination images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(3):192-199.
- [10] 张新明, 沈兰荪. 基于小波的同态滤波器用于图像对比度增强[J]. 电子学报, 2001, 29(4):531-533. ZHANG X M, SHEN L S. Image contrast enhancement by wavelet based homomorphic filtering [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(4):531-533. (in Chinese)
- [11] UCHE N, PETER L. Homomorphic filtering of colour images using a spatial filter kernel in the HSI colour space [C]. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway*, 2008:1738-1743.
- [12] DAVID T, RACHID D. Vector-Valued image regularization with PDEs; A common framework for different applications [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2005, 27(4):506-517.
- [13] YI D K, LEE S Y. Fourth-order partial differential equations for image enhancement [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 175:430-440.
- [14] ZHU L X, XIA D S. Staircase effect alleviation by coupling gradient fidelity term [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(8):1163-1170.
- [15] 张文生. 科学计算中的偏微分方程有限差分法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:40-58. ZHANG W S. *Finite Difference Methods for Partial Differential Equations in Science Computation* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 40-58. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨永敏(1981—),男,河北卢龙人,博士研究生,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事表面缺陷图像处理、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: hitymyang@163.com



樊继壮(1976—),男,江苏连云港人,博士,讲师,1999年、2002年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士学位,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事仿生机器人、自动控制、测控系统等方面的研究。E-mail: fanjizhuang@hit.edu.cn

#### 导师简介:



赵杰(1968—),男,河北卢龙人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、1996年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事多传感器系统集成及控制技术、基于Internet网络机器人的遥操作技术 Haptic interface 及临场感知技术以及自重构模块化机器人技术等方面的研究。E-mail: jzhao@hit.edu.cn