

一种基于模板匹配的亚像素椭圆检测算法

卫 炆, 霍 光, 周超超, 孙国明, 曹 阳, 谢良平

(中航工业西安飞行自动控制研究所 光学部, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对熊猫光纤端面图像识别, 提出了一种亚像素椭圆特征检测方法. 通过参数分离和精度逐级递增的模板匹配, 将算法的时间复杂度降低为 $O((\log n)^2)$. 经实验检验, 在低噪声环境下, 该算法检测平均误差低于 0.04 像素; 在高噪声和图像不完整的情况下, 检测平均误差仍低于 0.07 像素.

关键词: 亚像素; 模板匹配; 参数分离; 精度递增

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)07-0156-05

A Sub-Pixel Ellipse Detection Algorithm Based on Improved Template Matching

WEI Yang, HUO Guang, ZHOU Chao-chao, SUN Guo-ming,
CAO Yang, XIE Liang-ping

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper presents a sub-pixel ellipse detection algorithm on image identification of panda fiber endface. Using parameter separation and precision progressive increase method, the time complexity of the algorithm could be decreased to $O((\log n)^2)$. The average detection error of this algorithm is less than 0.04 pixel under low noise image. This number will increase to 0.07 pixel under the case of high noise and incomplete ellipse.

Key words: sub-pixel; template matching; parameter separation; precision progressive increase

1 引言

熊猫光纤的端面图像识别^[1-2]是光纤熔接、对接耦合、尾纤、跳线制作过程中的关键技术. 图 1 展示了两张标准 125 μm 熊猫光纤的端面显微照片. 其外径为 125 μm 的正圆, 两个深色的椭圆是光纤的应力区, 其直径约 30 μm , 椭圆度大于 0.97. 中心亮斑是光纤纤芯, 直径约为 7 μm . 纤芯通常不可见. 对光纤端面的图像处理主要是识别其特殊轴轴向, 熊猫光纤的特殊轴定义为两个应力区中心的连线, 称作慢轴, 与之垂直的轴称作快轴. 通过检测两个椭圆应力区的圆心可以得到该轴向. 因为应用环境特殊, 该检测过程具备一些非常规应用特点: ①因光纤直径很小, 观察必须依靠显微镜进行, 显微图像的对比度低, 噪声大, 易受外界干扰, 灰度不均匀^[3]; ②光纤

尺寸的一致性, 待识别图像的形状、尺寸、相对位置比较固定, 这给图像识别带来了很大的便利; ③需要识别的图像是一个椭圆度很高的椭圆 (>0.97). 并且在多数实际应用中, 该椭圆的两轴分别与画面的 x 轴、 y 轴近似平行, 即该椭圆的倾角可以近似看作 0° ; ④识别精度要求高 (应力区轴向角度误差 $<0.2^\circ$), 以本实验室的显微设备为例, 这要求椭圆圆心的位置检测精度优于 0.4 像素.

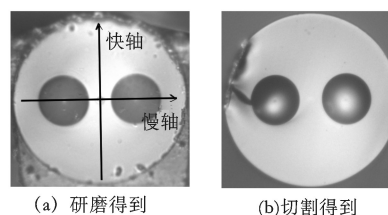


图 1 两种光纤端面

传统的椭圆检测方法更为关注检测椭圆的大体位置、形状、数目^[4-5],其检测精度难以突破像素级,无法满足光纤端面的检测要求.本文提出了一种基于椭圆环模板匹配^[6]的检测方法,通过将高精度(0.1像素)的理想椭圆环模板与原图像进行匹配,找到匹配度最高的一个椭圆环模板,即可通过模板椭圆方程得到目标椭圆的圆心坐标.

2 算法准备

倾角为0的椭圆环可以用圆心横坐标 x_0 、圆心纵坐标 y_0 、长轴长 a 、短轴长 b 、宽度 w 等5个参数描述,交叉遍历这些参数进行模板匹配,其计算量是难以想象的.针对这个问题,本文提出了一种改进的模板匹配算法,主要包含三个方面:

① 通过事先积累的经验参数,压缩计算范围,提升算法效率和自动化程度;

② 将椭圆5个变量分离为3组独立进行模板扫描,对于 $1/n$ 像素的匹配精度,算法时间消耗从 $O(n^4)$ 优化为 $O(n^2)$;

③ 通过匹配步进逐级递减的方法,提升了匹配的收敛速度.其思想是,以大的步长(低精度)进行大范围扫描,得到匹配结果后,在匹配结果周围再缩小步长(提高精度)进行小范围扫描,找到新的匹配结果.迭代上述过程,直到将计算步长缩小到令人满意的程度,停止计算.这部分算法是二分法的一个推广,将算法的时间消耗从 $O(n^2)$ 优化为 $O((\log n)^2)$;

2.1 截取目标椭圆灰度图

截取单个应力区的灰度图,其尺寸应确保包含完整的应力区椭圆,记为 $G\{i, j\}$,该二维数组的元素取值在 $0 \sim 255$ 之间.

2.2 边缘检测并二值化

使用 sobel 或 prewitt 等二维边缘检测算子对 $G\{i, j\}$ 做卷积^[7],得到边缘权值矩阵 $B\{i, j\}$.使用合适的阈值将矩阵 $B\{i, j\}$ 二值化得到二值矩阵 $E\{i, j\}$.

2.3 形态学处理

将高噪声图像二值化后,不可避免地会引入一些较窄的间断,引入闭操作可以弥合这些间断.再通过开操作去除显微图像常见的噪声,平滑轮廓,清除突出物^[11].对 $E\{i, j\}$ 做形态学处理得到优化的二值矩阵 $F\{i, j\}$.

2.4 获得模板初值

(1) 在 $F\{i, j\}$ 的最上三分之一的子矩阵 $F\{i,$

$1:j/3\}$ 中,横向搜索高度为1像素,宽度最长的一条横线段,其纵坐标记为 y_h ,图2中给出了一个示例.理想情形下,这条线近似对应于目标椭圆环内侧椭圆的上切线.以此类推,找到下切线纵坐标 y_b ,左切线横坐标 x_l ,右切线横坐标 x_r .同时,将线段的长度记为找到的每个坐标的置信度.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

图2 找到最长竖线的示意图

(2) 对于理想情形, (x_l, y_h) 、 (x_l, y_b) 、 (x_r, y_b) 、 (x_r, y_h) 四点所围成的矩形应该近似是目标椭圆环内侧椭圆的外切矩形,但为了增加程序鲁棒性和自动化程度,需要从两个角度对这四个坐标值进行置信度评估:

① $(x_r - x_l) / 2$ 、 $(y_b - y_h) / 2$ 应近似是目标椭圆的长轴和短轴长,其值如果分别落在通过先验经验给出的数值区间内,则认为可信;

② 如果某一个轴长度不可信,则评价相应的两个坐标的置信度.例如长轴长不可信,则评价 x_r 和 x_l 的置信度.然后用置信度高的一个坐标来修正另一坐标.例如 x_r 置信度更高,则可将 x_l 修正为 $(x_r - \text{经验长轴长})$.如果两个坐标的置信度都低于阈值,则跳出,进行人为修正.

(3) 最终确定的 (x_l, y_h) 、 (x_l, y_b) 、 (x_r, y_b) 、 (x_r, y_h) 四点所围成的矩形的内切椭圆($\theta = 0$)即为椭圆环内侧椭圆,其方程为

$$\frac{(x - x_0)^2}{a_0^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b_0^2} = 1 \quad (1)$$

$$x_0 = \frac{x_r + x_l}{2}, y_0 = \frac{y_b + y_h}{2},$$

$$a_0 = \frac{x_r - x_l}{2}, b_0 = \frac{y_b - y_h}{2}$$

式(1)给出的椭圆方程对应椭圆环的内椭圆,则外椭圆方程为

$$\frac{(x - x_0)^2}{(a_0 + w_b)^2} + \frac{(y - y_0)^2}{(b_0 + w_b)^2} = 1 \quad (2)$$

下文将证明,椭圆环宽度 w 的值对于粗匹配来说并不重要,但对于亚像素级匹配则十分关键.实验发现,椭圆环宽度通常介于 $3 \sim 7$ 像素.因此将椭圆环宽度初值 w_b 设置为5.

(4) 根据以上两个椭圆方程,即可生成二值矩

阵 $T_0\{i, j\}$, 像素中心位于两椭圆之间的点赋为 1, 其他点赋为 0, 该矩阵即可作为模板初值. 基于先验经验的置信度评价确保了模板初值和目标椭圆的参数误差是可控的, 在应用本算法的实验中, 圆心坐标误差不超过 10 像素, 轴长误差不超过 5 像素. 也即目标椭圆的圆心横坐标、纵坐标、长轴长、短轴长一定落在 $x_0 \pm 10, a_0 \pm 5, y_0 \pm 10, b_0 \pm 5$ 范围内.

3 模板匹配

使用模板 $T\{i, j\}$ 来匹配二值矩阵 $F\{i, j\}$, 具体操作是对两个矩阵对应点做异或运算, 得到匹配

$$\text{度量值 } e = \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^j \overline{F_{x,y} \oplus T_{x,y}}.$$

理论上, 使用原始的遍历扫描思路, 在一定范围内以给定步进精度 $1/n$ (例如 $1/10$ 像素) 五维交叉扫描椭圆环的圆心横坐标 x_0 、长轴长 a 、圆心纵坐标 y_0 、短轴长 b 、环宽度 w 等 5 个参数, 生成海量模板, 即可找到匹配度最高的椭圆环, 从而得到最为精确的椭圆参数. 以下计算这种思路的时间消耗:

一次模板的生成和匹配的时间消耗和图像规模成线性关系, 如果图像规模不变, 其时间消耗几乎是固定的 (实验中约为 0.239 ms). 以 2.4 节给出的扫描范围为准, 考虑到环宽度 w 可以通过其他算法独立计算, 暂时忽略这一参数.

总匹配次: $N = 20n \times 10n \times 20n \times 10n = 4 \times 10^4 n^4$;

算法时间复杂: $T(n) = O(n^4)$.

如果扫描步进达到 0.5 像素, 匹配次数将达到 640 000 次, 约需 153 s; 0.1 像素则需要匹配 4×10^8 次, 约需 26.5 小时. 这显然不具备工程应用条件.

3.1 参数分离

为缩小计算量, 分析五个参数之间的耦合关系.

设目标图像是由式 (3) 定义的椭圆环 E_g , 用式 (4) 定义的模板 E_t 进行匹配.

$$E_g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \frac{(x-x_g)^2}{a_g^2} + \frac{(y-y_g)^2}{b_g^2} \geq 1 \\ & \text{且 } \frac{(x-x_g)^2}{(a_g+w_g)^2} + \frac{(y-y_g)^2}{(b_g+w_g)^2} \leq 1 \\ 0, & \text{当 } \frac{(x-x_g)^2}{a_g^2} + \frac{(y-y_g)^2}{b_g^2} < 1 \\ & \text{或 } \frac{(x-x_g)^2}{(a_g+w_g)^2} + \frac{(y-y_g)^2}{(b_g+w_g)^2} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

定义匹配度 $S = \sum E_g(x, y) \oplus E_t(x, y)$, S 的解析求解过于复杂, 通过数值方法分析参数之间的

相关性.

不失一般性, 仅对 x_t 和其他 4 个参数之间的相关性进行仿真分析.

$$E_t(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \frac{(x-x_t)^2}{a_t^2} + \frac{(y-y_t)^2}{b_t^2} \geq 1 \\ & \text{且 } \frac{(x-x_t)^2}{(a_t+w_t)^2} + \frac{(y-y_t)^2}{(b_t+w_t)^2} \leq 1 \\ 0, & \text{当 } \frac{(x-x_t)^2}{a_t^2} + \frac{(y-y_t)^2}{b_t^2} < 1 \\ & \text{或 } \frac{(x-x_t)^2}{(a_t+w_t)^2} + \frac{(y-y_t)^2}{(b_t+w_t)^2} > 1 \end{cases} \quad (4)$$

设目标椭圆环 E_g 的参数为: $x_g = 0, a_g = 78, y_g = 0, b_g = 76, w_g = 5$.

① 固定 $a_t = a_g = 78, b_t = b_g = 76, w_t = w_g = 5, y_t = 0 \sim 10$, 扫描 x_t .

② 固定 $a_t = a_g = 78, y_t = y_g = 0, w_t = w_g = 5, b_t = 67 \sim 76$, 扫描 x_t .

③ 固定 $a_t = a_g = 78, y_t = y_g = 0, b_t = b_g = 76, w_t = 1 \sim 9$, 扫描 x_t .

图 3(a)、(b)、(c) 分别展示了 ①、②、③ 的扫描结果, 图中横坐标是 x_t , 纵坐标是匹配度 S . 3 幅图中位于最上方的曲线是一致的, 都对应于 $a_t = 78, b_t = 76, y_t = 0, w_t = 5$ 的情况, 此时 S 关于 x_t 的扫描具有最大的对比度, 在 x_t 准确时 ($x_t = x_g$), S 取得理论最大值 100%. 在图 3(a) 中, 随着 y_t 偏离准确值 y_g , 曲线整体逐渐下降, S 随 x_t 变化的灵敏度在下降, 但峰值依然出现在 $x_t = x_g = 0$ 处. 在图 3(b)、(c) 中都观察到了类似的现象, 这说明 y_t, b_t 的取值在 10 像素的偏差内或 w_t 的取值在 4 像素的偏差内, 不会影响 x_t 扫描的准确性.

④ y_t, b_t, w_t 同时存在偏差, 扫描 x_t .

以上分析存在一个局限, 即研究每一个参数时, 其他参数默认准确. 实际扫描时, 存在几个参数都不准确的情况, 此时独立扫描 x_t 是否依然准确, 需要进一步仿真验证. 对以下 11 种情况分别扫描 x_t , 每次扫描的 w_t 均固定为 3, 和 w_g 存在 2 像素偏差; a_t 固定为目标值 a_g ; 第 i 次扫描的 y_t 设置为 $y_g - i, b_t$ 设置为 $b_g - i$. 图 3(d) 展示了扫描结果, 与 ①②③ 的情况类似, 随着偏差增加, 扫描灵敏度下降, 但 S 峰值还是出现在中心 $x_t = x_g$ 处, 说明扫描依然是准确的.

⑤ 固定 $y_t = y_g = 0, b_t = b_g = 76, w_t = w_g = 5, a_t = 69 \sim 78$, 扫描 x_t .

圆心横坐标 x_t 和长轴 a_t 都是横向参数, 推测相

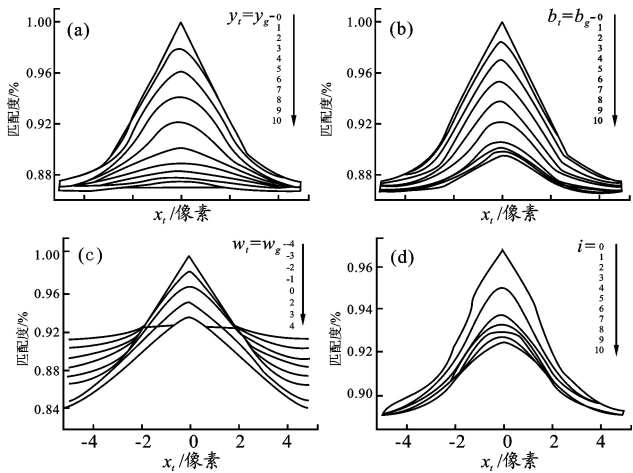


图 3 ①②③④ 组扫描结果

关性比较强,图 4 展示了针对 a_i 的扫描结果. 仿真显示,当 a_i 和 a_g 偏差达到 3 像素时, x_i 的扫描已经很不灵敏;当 a_i 和 a_g 的差超过 3 像素后, S 最大值已经不出现中心 $x_i = x_g$ 处,而是如预期在两侧出现对称双峰. 随着 a_i 偏离增大,双峰会愈加明显. 这说明 a_i 和 x_i 之间有明显的耦合关系,不能独立扫描.

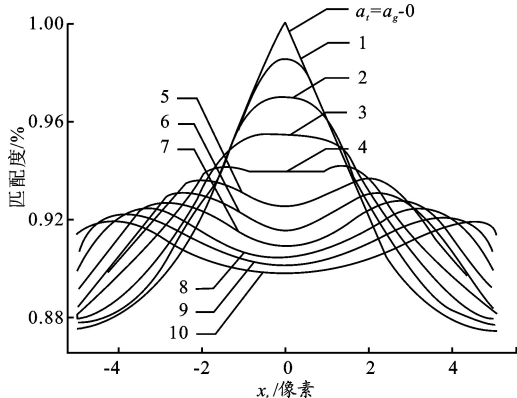


图 4 ⑤ 组扫描结果

关于 x_i 的仿真充分证实 x_i 和 y_i 、 b_i 、 w_i 的相关性很弱,和 a_i 的相关性很强,和预期结果一致. 同理可证, y_i 具备完全一致的属性. a_i 、 b_i 参数存在少许差异,但规律完全一致,这里不再赘述.

综上所述,横向参数 x_i 和 a_i 之间相关性强,划为横向组;纵向参数 y_i 和 b_i 之间相关性强,划为纵向组;宽度单独作为一组. 三组之间相关性很弱.

根据该结论设计一种改进的扫描思路:扫描横向组时,固定纵向组和宽度;扫描纵向组时,固定横向组和宽度;宽度 w_i 开始固定为 5,精度提升后独立进行检测. 这样算法的总匹配次数缩减为

$$N = 20n \times 10n + 20n \times 10n = 400n^2.$$

$$\text{时间复杂度 } T(n) = O(n^2).$$

如果扫描步进达到 0.1 像素需要匹配 40 000

次,约需 9.6 s,已经可以满足部分工程应用要求,但仍无法做到即时检测.

3.2 步进精度递增

为了进一步压缩检测时间,本文将每一组扫描分成数轮迭代进行. 第一轮扫描以 2.4 节中给出的模板初值 T_0 为中心值,后续每轮扫描都以前一轮的匹配结果作为中心值,缩小范围和步进,进一步扫描. 直到步进精度符合要求. 这种思路是二分法的一种推广,这使得算法的时间复杂度进一步压缩到

$$T(n) = O((\log n)^2).$$

表 1 中给出了实验中实际使用的一种扫描流程.

表 1 扫描流程 (像素)

① 横向第 1 轮					
	x_i	a_i	y_i	b_i	w_i
扫描范围	± 10	± 6	锁定		5
步进精度	5	3			
② 纵向第 1 轮					
扫描范围	锁定		± 10	± 6	5
步进精度			5	3	
③ 横向第 2 轮					
扫描范围	± 4	± 2	锁定		5
步进精度	2	2			
④ 纵向第 2 轮					
扫描范围	锁定		± 4	± 2	5
步进精度			2	2	
⑤ 横向第 3 轮					
扫描范围	± 1.6	± 1.6	锁定		检测 结果
步进精度	0.8	0.8			
⑥ 纵向第 3 轮					
扫描范围	锁定		± 1.6	± 1.6	检测 结果
步进精度			0.8	0.8	
⑦ 横向第 4 轮					
扫描范围	± 0.6	± 0.6	锁定		检测 结果
步进精度	0.3	0.3			
⑧ 纵向第 4 轮					
扫描范围	锁定	± 0.6	± 0.6		检测 结果
步进精度					
⑨ 横向第 5 轮					
扫描范围	± 0.2	± 0.2	锁定		检测 结果
步进精度	0.1	0.1			
⑩ 纵向第 5 轮					
扫描范围	锁定		± 0.2	± 0.2	检测 结果
步进精度			0.1	0.1	

前 4 轮使用固定宽度 5,之后每轮都对椭圆宽

度进行检测,并使用检测结果进行下一轮扫描.

由于椭圆拟合不单调收敛,经过多次对比,确定了以上以“四分”为主的迭代流程,较好的平衡了精度和效率.总匹配次数 230 次,匹配耗时 55 ms,完全可以满足即时检测要求.

4 实验结果

图 5 展示了一次光纤端面应力区检测的全流程,所处理的光纤展示于图 1(b):

- ① 截取待测区域
- ② 通过边缘检测二值化
- ③ 形态学处理
- ④ 检测椭圆外切矩形
- ⑤ 置信度检测并自动修正(图④通过置信度检测,无需修正)
- ⑥ 模板匹配(为了对比清晰,将检测结果向外扩 2 个像素)

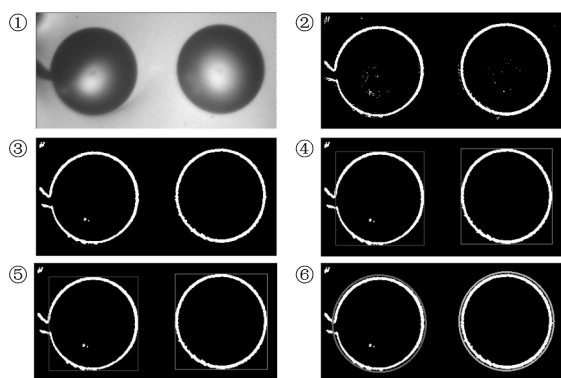


图 5 应力区检测流程

实拍图像的准确参数无从获取,对其进行检测并不能量化算法的检测精度.因此通过软件方法随机生成椭圆环二值图(根据式(3)),并参考实际图像对所生成图像进行两项处理:①加入随机噪声;②部分圆弧缺失.使用本算法对生成图像进行检测,对比检测结果和实际参数,即可量化算法的检测精度.以下分别对低、中、高噪声三种情况进行软件检测,①1%随机噪声、无缺失;②5%随机噪声、30°弧缺失;③10%随机噪声、60°弧缺失.图 6 中展示了三种情况的软件生成图.

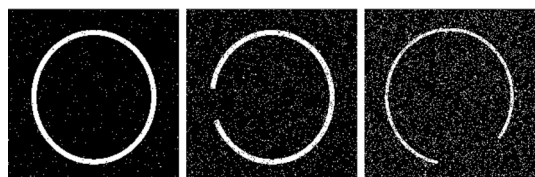


图 6 软件生成二值图

每次检测均在下式规定的范围内随机生成椭圆环参数,小数点后保留两位有效数字,对三种情况分别进行 10 000 次检测.

$$x_g \in [-1, 1], a_g \in [76, 82], y_g \in [-1, 1], b_g \in [74, 80], w_g \in [3, 7]$$

统计检测结果各个参数误差的平均值和标准差,见表 2.

表 2 算法精度检测结果

序号	x_0		y_0		a		b	
	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
①	0.037	0.032	0.038	0.035	0.086	0.081	0.111	0.114
②	0.043	0.038	0.043	0.040	0.100	0.093	0.122	0.128
③	0.064	0.098	0.067	0.174	0.138	0.162	0.160	0.240

在低噪声情况下,圆心坐标 x_0 、 y_0 检测误差平均值和标准差均小于 0.04 像素,轴长 a 、 b 误差较大,平均值和标准差均约 0.1 像素.随着噪声增大和图像不完整度增加,误差逐渐增大.在高噪声和 60° 弧缺失的情况下,圆心坐标检测误差平均值接近 0.07 像素,标准差接近 0.2 像素,但仍满足 0.4 像素的检测要求.

5 结束语

本文提出了一种可应用于熊猫光纤端面检测的亚像素级椭圆特征检测方法.通过对椭圆环 5 个参数的相关性进行深入研究,提出了参数分离的匹配思路,将算法时间复杂度降低两个量级.最后根据二分法的思想设计了精度逐级递增的匹配流程,进一步将时间复杂度降低到 $O(\log n)^2$ 水平.经实验检验,单图像匹配时间约为 55 ms,完全可以达到即时检测的要求.在低噪声且图像完整的情况下,检测平均误差仅为 0.04 像素;在高噪声且图像有部分残缺的情况下,检测平均误差仍低于 0.07 像素.本算法经工程检验是合格高效的,已服务于本课题.

参考文献:

- [1] 游建民,陶林. Panda 型保偏光纤偏振轴图像识别算法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 247-250.
- [2] 裘建新,钟平. 基于计算机视觉的保偏双尾纤装配精度检测[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(Suppl): 75-78.
- [3] 彭宣戈,欧阳春娟,欧阳迎春,等. 多方向一维小波变换的显微图像去噪[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(12): 31-33.

(下转第 166 页)



(a)图5(c)对应区域的放大结果 (b)图5(d)对应区域的放大结果

图 6 阴影消除的结果放大比较

法,并将其应用到各种图像处理的任务中,比如图像修复和阴影消除等.通过与其他比较成熟的算法相比,本文方法能够取得令人满意的结果.在图像复原中,通过最小化空间直方图变换的各个分量,能够为复原质量带来不同的影响.在大多数图像复原任务中能够取得比现有方法更优的质量.在阴影消除中,通过直方图变换能够将阴影区域外部的颜色信息应用到阴影消除区域内部,同时结合阴影区域的结构信息,能够得到和真实图像非常相近的复原图像,同时不会产生斑点图像,复原质量非常高.

参考文献:

- [1] Bugeau A, Bertalmio M, Caselles V, et al. A comprehensive frame work for image inpainting [J]. IEEE Trans Image Process, 2010,19(10):2634-2645.
- [2] 王向阳,杨红颖,郑宏亮,等.基于视觉权值的分块颜色直方图图像检索算法[J].自动化学报,2010,36(10):1489-1492.
- [3] Delon J. Movie and video scale-time equalization application to flicker reduction [J]. IEEE Trans Image Process,2006,15(1):241-248.
- [4] 于永健,王向阳,吴俊峰.基于颜色复杂度的加权颜色直方图图像检索算法 [J]. 小型微型计算机系统,2009,30(3):507-511.
- [5] Papadakis N, Provenzi E, Caselles V. A variational model for histogram transfer of color images[J]. IEEE Trans Image Process,2011,20(6):1682-1695.
- [6] Rabin J, Delon J, Gousseau Y. Regularization of transportation maps for color and contrast transfer[C]//Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Image Processing. Hong Kong:IEEE,2010:1933-1936.
- [7] 杜振龙,李晓丽,郭延文,等.大尺度图像编辑的泊松方程并行多重网格求解算法[J].计算机科学,2013,40(3):59-61.
- [8] Li H, Wang S, Wu W Z M. Image inpainting based on scene transform and color transfer[J]. Pattern Recognition Lett, 2010,31(7):582-592.
- [9] 张新明,孙印杰,郑延斌.二维直方图准分的 Otsu 图像分割及其快速实现[J].电子学报,2011,39(8):1778-1784.
- [10] Sunkavalli K, Johnson M, Matusik W, et al. Multi-scale image harmonization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010(125):1-10.
- [11] Singh B, Sinha G, Khan I. Comparison of histogram and spatiograms for content based retrieval of remote sensing images[C]//Proceedings of the International COnference on Recent Trends in Business Administration and Information. India:IEEE,2010:152-156.
- [12] 魏雪峰,刘晓.基于2维最大熵最佳阈值算法的图像分割研究[J].激光技术,2013,37(4):519-523.
- [13] Tschumperlé D. Fast anisotropic smoothing of multi-valued images using curvature-preserving PDE's[J]. Int J Comput Vis, 2006,68(1):65-82.
- [14] 张小琴,李懿,鲜雪梅,等.尿沉渣细胞图像的预处理和分割研究综述[J].吉首大学学报:自然科学版,2012,33(4):120-128.
- [15] Shor Y, Lischinski D. The shadow meets the mask: Pyramid based shadow removal[J]. Comput Graph Forum, 2008,27(2):577-586.

作者简介:

刘文辉 男,(1969-),硕士,副教授.研究方向图像处理、模式识别、人脸识别等.

许瑞 女,(1967-),硕士,副教授.研究方向为中文信息处理,模式识别等.

(上接第 160 页)

- [4] 陈维义,罗晓沛.基于 Hough 变换和变形曲线技术的椭圆提取研究[J].微电子学与计算机,2004,21(9):91-95.
- [5] 薛程,王士同.椭圆检测算法的比较[J].江南大学学报:自然科学版,2006,5(6):674-678.
- [6] Mark S Nixon, Alberto S Aguado.特征提取与图像处理[M].2版.李实英,杨高波,译.北京:电子工业出版社,2010.
- [7] 付光远.一种基于 Sobel 分解算子的图像边缘检测并行算法[J].微电子学与计算机,2006,23(9):132-134.

作者简介:

卫 炆 男,(1985-),博士,工程师.研究方向是光纤陀螺光电器件以及集成光学技术.