

基于最优识别区间的变步长产品表面缺陷检测研究

徐青 韩跃平 杨志刚 孙宝华

(中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要 为实现对产品表面多个待检区域准确快速的检测,在最优识别区间内采用变步长机制快速获取待测产品的周向方位图像序列,实现在有限方位下利用不完全数据对多个待识别区域的快速检测。首先通过相关度计算及投影法确定各待检区域的最优识别区间和旋转步长,其次采用尺度不变特征变换(SIFT)算法与折半查找法确定随机摆放的待检产品在标准库中的最优位置信息,最后通过相关度计算判别各区域有无缺陷。实验表明在保证检测准确率的前提下,基于最优识别区间的变步长方法比传统全周向固定步长检测平均可节省 6.37 s。

关键词 图像处理;缺陷检测;最优识别区间;变步长采样;尺度不变特征变换算法;折半查找法

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101001

Variable Step Detection of Product Surface Defect Based on Optimal Identification Interval

Xu Qing Han Yueping Yang Zhigang Sun Baohua

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract In order to achieve the detection of multiple regions in the product surface rapidly and accurately, we select variable step mechanism to obtain the circumferential image sequence of the products to be tested in the optimal recognition interval quickly so that some incomplete data could be utilized to realize the rapid detection of multiple areas in the limited orientation. First of all, we need to determine the optimal identification range of the area and the rotation step through relativity calculation and projection method. Secondly, the scale invariant feature transform (SIFT) algorithm and binary search method are selected to find the optimal location information of product in the standard image library. Finally, we distinguish there are some defects or not by relativity calculation. The experiment results demonstrate that the variable step size method based on optimal identification interval can save an average time of 6.37 s than the traditional full-circumferential fixed step method while ensuring the detection accuracy.

Key words image processing; defect detection; optimal identification range; variable step size sampling; scale invariant feature transform algorithm; Binary search method

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.5010; 100.5760

1 引言

检测技术是现代工业生产的重要技术之一,是保证产品质量的重要手段。传统的检测方式主要是人工随机抽样离线检测,但这种检测方式受人主观影响较大,很难保证检测的准确性和一致性。离线检测时间长,产品缺陷得不到及时纠正,造成材料浪费,生产效率大大降低。在这种情况下,急需一种快速的缺陷检测系统^[1]。

近年来,随着红外技术、CCD技术和计算机技术的飞速发展,基于激光扫描、光谱图像、红外成像和超声

收稿日期: 2013-05-12; 收到修改稿日期: 2013-06-22; 网络出版日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61171178,61171179)、山西省自然科学基金(2012011010-3)、2012年山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 徐青(1989—),女,硕士研究生,主要从事X射线无损检测与图像处理技术等方面的研究。

E-mail: sizhuqingsci@163.com

导师简介: 韩跃平(1974—),男,博士,副教授,主要从事X射线无损检测、图像处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: hanyueping@nuc.edu.cn

波扫描的机器视觉检测技术得到了日益广泛的应用^[2-6],应用场合包括诸如航天、航空、军事、电子、机械、新材料研究等多种领域,特别是在生产线大批量产品的检测中。

国外在产品自动检测领域的研究较早,如美国的 NI、Cognex、PROIMAGE 公司,瑞士的 BOBST 公司,德国的 VMT 公司,加拿大的 Hexsight 公司,日本的 DAC、TOKIMEC、Keyence 公司等,都已能提供产品缺陷在线检测系统,并获得了较好的应用与推广,如国 Yxlon、GE 等公司成功研制出的各种移动式、便携式、微焦点 X 射线检测系统,轮胎/轮毂检测系统,行李与包裹检测系统等系列产品都已投放市场。目前国内的自动检测技术也有了较大的发展,如北京大恒图像、深圳赛克数码、上海法视特、苏州南光电子等公司以及国内大多数高校科研院所等都在从事视觉检测技术的研发工作,而且无论在检测系统设计还是理论算法研究上,都取得了众多成果。北京凌云光视数字图像技术有限公司研发的印刷品表面质量分析检测仪和大恒图像技术有限公司的玻璃瓶质量在线检测系统及人民币号码在线检测系统都已用于实际检测中^[7]。

产品检测的关键技术问题是如何在快速、稳定和准确之间取得平衡,它是确保一个机器视觉系统能在工业实时检测领域成功应用的核心问题。传统检测大多采用针对最小待识别目标的固定旋转步长在全周向区间进行检测。实际上由于每一待检区域都分布在产品特定的周向区间且各待检区域尺寸与结构形状各不相同,对不同待检区域在对应的最优识别区间内采用变步长进行检测去除了冗余信息的干扰,减少了参与匹配的方位图像个数,从而可以提高了检测的准确率及速度。基于这一思想,本文首先通过相关度计算及投影法确定各待检区域的最优识别区间和相应的旋转步长,并按各步长在最优化识别区间内获取待测产品图像序列。为保证标准库中信息的完整性,选一最小步长作为合格品采样步长,获取合格品全周向图像序列。其次采用尺度不变特征变换(SIFT)算法与折半查找法确定随机摆放待检产品在标准库中的最优位置信息,最后通过相关度计算判别各区域有无缺陷。

2 产品检测的总体流程

自动识别技术是由计算机代替或模拟人眼判读的视觉检测原理,其系统框图如图 1 所示^[8]。

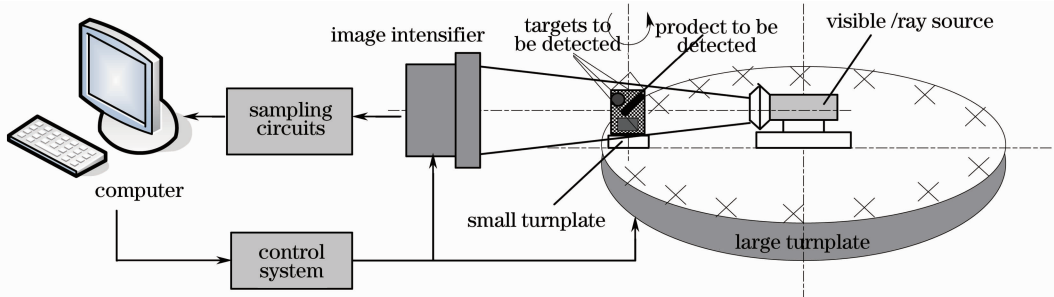


图 1 视觉检测原理框图

Fig. 1 Scheme of the vision inspection system

常见的产品缺陷可分为内部装配缺陷与外部表面缺陷,这两种缺陷信息是通过不同成像系统得到的,但对获取图像所采用的图像处理算法具有通用性。为使所选对象具有代表性且更好地验证算法效果,用测试分辨率的具有代表性的黑白线对数(每毫米)来验证。由图 1 所示的检测原理知,实际检测对象为具有轴对

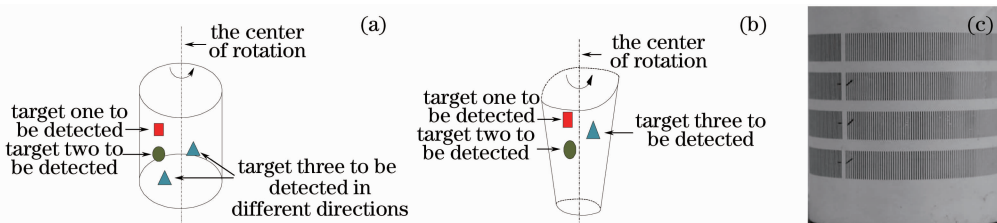


图 2 待检产品类型。(a) 轴对称结构产品;(b) 非对称结构产品;(c) 实验所用圆柱产品

Fig. 2 Type of product to be tested. (a) Axisymmetric structural product; (b) non-symmetric structural product; (c) cylindrical product used in the experiment

称结构的产品且有多个待识别目标,如图 2(a)所示;即使所检产品不对称,也可设其绕某一轴线旋转,如图 2(b)所示。实验所用具有代表性的圆柱表面不同分辨率的黑白条纹如图 2(c)所示。

3 算法介绍

3.1 最优识别区间及区域内旋转步长的确定

每一待检区域都分布在产品特定的周向范围,即都有对应的最优识别区间,在该区间内检测去除了冗余信息的干扰、减少了待检图像的数量,不仅可以提高准确性还可以加快检测速度。为了准确确定每一待检区域的最优识别区间,在每个区域的边界处制造不同的缺陷,然后以 0° 为基准旋转缺陷产品并根据

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left[\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 \right] \left[\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2 \right]}}, \quad (1)$$

计算对应方位下缺陷区域与合格区域的相关度。(1)式中 A_{mn}, B_{mn} 分别代表待检区域与合格区域对应位置的像素值; \bar{A}, \bar{B} 分别代表相应的均值。

在实际检测时,由于待检产品是随机摆放的,若以 1° 为采样步长获取图像序列,则最大可能会产生 0.5° 的误差即待检产品放在某一旋转步长一半的位置处,因此需计算待检产品与合格品相差采样间隔一半角度时对应的相度。通过计算与合格品正对位置及偏差采样间隔一半角度时相度的均值确定最优识别区间。由于缺陷在区域的边界处,因此每一待检区域一旦出现相度就会下降,但在最优的识别方位下相度达到最低。根据所得相度曲线的波谷位置即可判断出对应的最优区间。

由于各待检区域尺寸与结构形状各不相同,因此对不同识别区间采用变步长机制旋转不同角度与标准库中对应位置的图像进行匹配识别,这样可以在不损失准确率的情况下提高检测的速度。在各区域条纹间距确定的情况下,本文采用垂直投影法确定相应的旋转步长,该方法本质上是一种统计方法^[8]。垂直投影就是将一列所有像素点的灰度值累加求和:

$$V(x) = \sum_{y=y_1}^{y_2} I(x, y), \quad x_1 \leq x \leq x_2, \quad (2)$$

式中 (x, y) 表示像素所处的位置, $I(x, y)$ 表示该像素点的灰度值。通过分析投影图中相邻冲击波谷位置的间距来确定相应旋转步长。

在图像采集阶段,为了提高检测的速度,对待检产品在各最优区间内采用变步长机制获取待检产品图像序列。在上述所有旋转步长中选一最小步长作为合格品采样步长,在检测周期 2π 范围内依次获取合格产品的 M 帧序列图像: X_1, X_2, \dots, X_M 。

3.2 随机摆放产品位置的确定

要实现未知产品在随机周向方位下所成图像的检测,首先要寻找其在合格品图像库中的最优方位信息。寻找最优位置其实是图像的匹配过程,常见的多视角产品匹配方法包括最稳定极值区域(MSER)^[9]、Harris-affine^[10]、Hessian-based Affine^[11]、Edge-based Regions^[12]、仿射尺度不变特征变换(ASIFT)算法^[13]和 SIFT 算法^[14-15]。在上述所有算法中,SIFT 算法不仅完美地实现了尺度空间理论,而且也是一种稳健性很高的特征描述符,其对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性,因此它是一种被广泛使用的特征提取算法。

SIFT 特征向量的生成过程如下:1) 构建尺度空间,检测极值点,获得尺度不变性;2) 特征点过滤并进行精确定位;3) 为每个关键点指定方向参数;4) 生成关键点的描述子。在上述步骤中,通过下式生成尺度空间:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) * I(x, y), \quad (3)$$

式中 $I(x, y)$ 代表图像, $G(x, y, \sigma)$ 代表尺度可变高斯函数。 σ 为可变的尺度参数,实验中图像的初始尺度为 $\sigma = 1.6$, 尺度空间各层迭代关系为 $\sigma = \sigma \times 2^{1/s}$, 其中 $s = 5$ 。

为了在尺度空间中检测出稳定的关键点位置, Lowe^[15] 提出在高斯差分(DoG)函数与图像卷积得到的空

间 $D(x, y, \sigma)$ 中寻找极值点:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma), \quad (4)$$

其中, 相邻两个尺度由一个常数 k 分开, 其实特征点就是 DoG 空间的局部极值点。为了提高关键点的稳定性和抗噪声能力, 需去除低对比度点和边缘上的点。在特征点被提取出来后, 通过以下各式生成特征描述符:

$$m(x, y) = \sqrt{I_x(x, y)^2 + I_y(x, y)^2}, \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{I_y(x, y)}{I_x(x, y)}, \quad (6)$$

$$I_x(x, y) = I(x+1, y) - I(x-1, y), \quad (7)$$

$$I_y(x, y) = I(x, y+1) - I(x, y-1), \quad (8)$$

式中 m 代表幅值, θ 表示方向。当待检产品图像和合格产品图像的 SIFT 特征向量生成以后, 采用关键点特征向量的欧氏距离作为两幅图像中关键点相似性判定度量。取待测图的某个关键点, 通过遍历找到距离标准图最近的两个关键点。在这两个关键点中, 如果次近距离除以最近距离小于某个阈值, 则判定为一对匹配点, 本文所选阈值为 0.8。

为了提高寻找最优解位置的速度, 根据 SIFT 匹配的点数结合折半查找的方法确定其位置。折半查找的基本思想是对于已按关键字排序的序列, 经过一次比较, 可将序列分割成两部分, 然后只在有可能包含待查元素的一部分中继续查找, 并根据试探结果继续分割, 逐步缩小查找范围直到找到为止。折半查找法每查找一次缩小一半的范围, 可减少一半的特征提取及匹配操作, 因此可提高其寻找速度。

3.3 缺陷检测

采用 SIFT 算法与折半查找法找到随机摆放产品在标准库中的最优方位信息后, 在各方位下计算待配图与标准图的相关度。为了保证合格品的质量, 取最优区间内所有曲线波峰中的最大值作为该区间的阈值, 若低于阈值则停止计算判别该区域为缺陷区域。当某一区域所有角度下的相似度都大于等于阈值 ρ_{th} 时, 则判断该区域无缺陷。

4 实验结果与分析

实验中所用相机为 Canon EOS 600D, 采用图像大小为 361 pixel \times 311 pixel, 实验条件为: 处理器 Intel (R) Core(TM) i7-3612QM 2.10 GHz, 内存 4.00 GB, Matlab2011b, 操作系统 Windows7。

为验证上述算法的效果, 以底圆直径为 8 cm、高 9.5 cm 的杯子为例进行实验, 杯子表面不同区域有不同间隔的条纹, 其中待检区域一每组条纹总长 9.6 cm, 高 1 cm, 相邻条纹间隔为 0.5 mm; 待检区域二每组总长 9 cm, 高 1 cm, 相邻条纹间隔为 1 mm; 待检区域三每组总长 5 cm, 高 1 cm 相邻条纹间隔为 2 mm。

为在每次实验中获取大量信息且符合实际检测情况, 将每个区域中的条纹分为四组, 其中第一组为合格条纹区域, 第二组为正对位置有缺陷的条纹区域, 后两组分别为右偏和左偏最小间距一半的有缺陷条纹区域。各区域及区域内各组情况如图 3 所示, 其中待检区域一边界处有长 1.5 mm 的水平划痕, 区域二有与水平方向成 45° 角长约 4.2 mm 的斜向上划痕, 区域三为起始两条纹间多了一条长 1 cm 的垂直条纹。

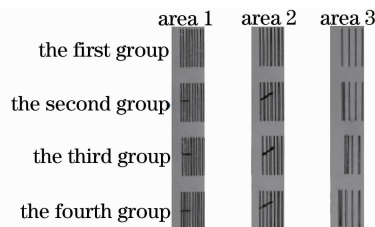


图 3 各区域及区域内各组条纹图

Fig. 3 Each area and each group of fringe image within the area

对于最优区间的确定从 360° 即 0° 位置开始以 -5° 为步长旋转产品, 在每幅图像上通过积分投影知以 $(x, y) = (182 \text{ pixel}, 68 \text{ pixel})$ 为起始坐标, 相邻纵坐标方向相差 60 pixel 分割出 4 个 $122 \text{ pixel} \times 44 \text{ pixel}$ 大小的区域即为每个区域内的各组条纹, 依次求取每个最优区间内第一组条纹与下面三组条纹的相关度。在此只

列出了区域一范围内的相关度曲线,如图4所示。

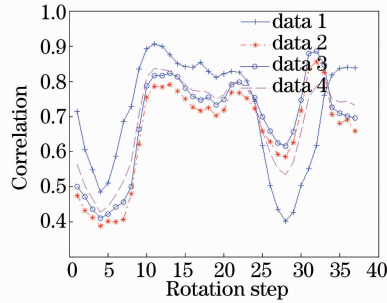


图4 待检区域一相关度计算曲线

Fig. 4 Correlation curve of the first area to be tested

图4中 data1、data2、data3 分别表示在相同方位下第一组与后三组的相关度曲线, data4 表示上述三条曲线取均值所得曲线。从均值曲线中可得波谷位置位于第4步和第28步处,因此可得第一区域的最优区间为 $220^{\circ} \sim 340^{\circ}$ 。为了保证合格品的质量,在最优区间内取上述4条曲线中的最大值点作为阈值可得区域一的阈值为 $\rho_{th} = 0.907$,即若某一角度下相关度小于该阈值则判别为该区域存在缺陷,同理可得区域二、区域三的最优区间及相应的阈值。取10个此类产品采用上述方法经过10次测试取均值后可得每个区域最优识别区间及所对应的阈值,如表1所示。

表1 各区域对应的最优识别区间及其阈值

Table 1 Optimal ranges of recognition and corresponding thresholds

	The first area to be detected	The second area to be detected	The third area to be detected
Optimal range of identification	220~340	65~210	30~60
Threshold ρ_{th}	0.905	0.908	0.912

在获取每一待检区域的最优识别区间后,采用投影法获取各区域内相应的旋转步长。对于区域一采用垂直投影法的效果如图5所示。

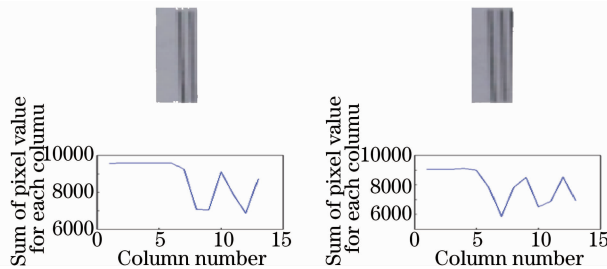


图5 待检区域一垂直投影图

Fig. 5 Vertical projection of the first area to be tested

为准确确定此区域的旋转步长,经10次实测分析得出,在垂直投影图中当相邻冲击波谷间的距离大于等于4 pixel时则会出现一个完整的黑白条纹,而此时的旋转步长为 0.5° ;对待检区域二和三采用相同的方法可得出相应的旋转步长为 1° 和 2° 。为保证标准库中信息的完整性,取上述最小旋转步长 0.5° 作为标准合格品的旋转步长,依次获取标准合格品的720幅图像作为模板库。

对随机摆放产品的检测首先要确定其在标准库中的位置。取一待检产品,其随机摆放的待配图与标准的 0° 基准图如图6所示,事先可知此产品是以标准库中的 0° 为基准旋转 189° 后所在位置。采用SIFT与折半查找法确定其在标准库中最优解位置的过程如表2所示,从表中可知待配图与标准库中 189° 图相对应。

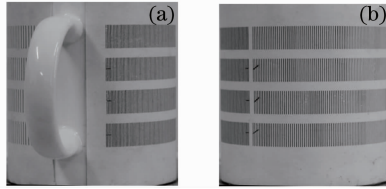


图6 基准图与待检产品图。(a) 0°基准图；(b) 随机摆放待检产品图

Fig. 6 Reference image and image of product to be tested. (a) Reference image of 0°;
(b) randomly placed image of the product to be tested

表2 基于SIFT算法的待配图像和标准图像序列匹配数目

Table 2 Matching numbers of the image to be matched and standard image sequence based on SIFT algorithm

	Image to be matched	0°	359°	180°	270°	225°	203°	192°	186°	189°	191°	190°
Number of key points	103	122	156	87	135	111	91	105	24	103	96	97
Number of matches		2	6	16	13	14	15	30	24	47	18	20

将待检产品转到待检区域一的最优识别区间 220°~340°内,按照步长 0.5°与相应的合格产品进行相似度计算,为使显示效果更清楚以 5°为间隔进行显示所得曲线如图 7 所示。

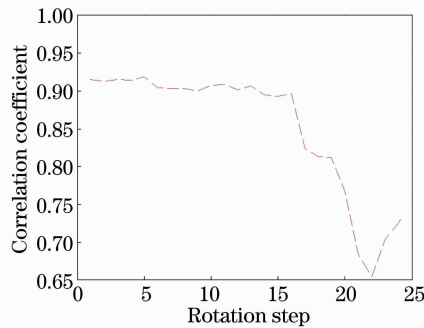


图7 待检区域一检测结果曲线

Fig. 7 Test result curve of the first area to be tested

在第 6 步时相关度 $\rho=0.904$ 小于阈值 ρ_{th} ,因此可判断该区域存在缺陷。缺陷最明显的位置为第 22 步即 325°处,此时的相关度为 $\rho=0.654$,该位置对应的合格区域与缺陷区域如图 8 所示。



图8 325°对应的合格区域与缺陷区域

Fig. 8 Qualified and defected areas at 325°

同理可得区域二在 65°时相关度 $\rho=0.6$ 小于阈值 ρ_{th} ,因此可判断区域二也存在缺陷;而区域三在最优识别区间内均大于阈值,为合格区域。区域二在 65°时分割出来的合格区域与缺陷区域如图 9 所示。



图9 65°对应的合格区域与缺陷区域

Fig. 9 Qualified and defected areas at 65°

对 10 个产品的不同区域制造缺陷,经实验测试均可正确判别。经 10 次测试知在整个检测过程中,寻找最优区间需时 20.40 s。确定随机摆放产品在标准库中的位置共需时间为 7.04 s。在最优识别区间内采用变步长机制判断三个区域有无缺陷共需时 1.29 s。因此在最优区间确定的情况下,对此产品采用变步长机制检测共需时 8.33 s。采用传统固定步长方法进行匹配,由于区域一在 245°时低于设定阈值,若以最小间隔

0.5°为步长即需计算 490 次相关度,共需时 14.7 s。因此,本文所用方法可节省 6.37 s。以上所有数据及图片均来自实验结果。

5 结 论

针对产品检测时庞大的数据量难以满足在线检测的实时性要求的问题,本文在最优识别区间及变步长方面做了一些研究。对产品表面有若干不同尺度与结构形状的待检区域,采用基于最优区间的变步长采样方法去除了冗余信息的干扰,减少了参与匹配比较的方位图像个数,在保证有效信息完整获取的情况下利用较少方位的图像达到对产品的快速检测。对于产品内部存在遮挡的待检区域,最优区间的识别方法不仅可以提高检测的速度,还可以提高检测的准确率。上述研究为实际工程应用奠定了良好基础,有助于加速计算机视觉检测技术在自动识别领域的推广应用。

参 考 文 献

- Xu Lang, Zeng Zhong, Liu Jinzan, *et al.*. Application and research of machine vision on on-line inspection for printed defect [J]. *Computer Systems & Applications*, 2013, 22(3): 186–190.
徐浪,曾忠,刘金赞,等. 机器视觉在印刷缺陷在线检测中的应用与研究[J]. *计算机系统应用*, 2013, 22(3): 186–190.
- Zhang Xuewu, Ding Yanqiong, Yan Ping. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312004.
张学武,丁燕琼,闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312004.
- Li Yaping, Zhang Guangjun, Li Qingbo. Application of O2-PLS in experimental study on non-invasive measurement of blood glucose[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 854–860.
李亚萍,张广军,李庆波. 基于 O2-PLS 方法的血糖无损检测实验研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 854–860.
- Wu Yiquan, Yin Danyan. Detection of small target in infrared image based on background predication by FLS-SVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2806–2811.
吴一全,尹丹艳. 基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2806–2811.
- Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for module surface defects based on constrained ICA model and PSO method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0415002.
龚芳,张学武,孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0415002.
- Shen Huan, Li Shunming, Bo Fangchao, *et al.*. On road vehicles real-time detection and tracking using vision based approach[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1076–1083.
沈暄,李舜酩,柏方超,等. 路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1076–1083.
- Han Fangfang. Key Techniques for Surface Defects Online Detection Based on Machine Vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. 3–7.
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, 2011. 3–7.
- Wang Wencheng, Chang Faliang. A precise eye localization method based on region projection[J]. *J Optoelectronics Laser*, 2011, 22(4): 618–622.
王文成,常发亮. 一种基于区域投影的人眼精确定位方法[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(4): 618–622.
- Matas J, Chum O, Urban M, *et al.*. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions[J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(10): 761–767.
- Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. *International J Computer Vision*, 2004, 60(1): 63–86.
- Lakemond Ruan, Sridharan Sridha, Fookes Clinton. Hessian-based affine adaptation of salient local image features[J]. *J Mathematical Imaging and Vision*, 2012, 44(2): 150–167.
- Tuytelaars T, Van Gool L. Matching widely separated views based on affine invariant regions[J]. *International J Computer Vision*, 2004, 59(1): 61–85.
- Yu Guoshen, Morel J M. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison[J]. *SIAM J Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438–469.
- Ji Ying, Lu Yueming. Method based on SIFT for recognition of flip images[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(3): 924–926.
及莹,陆月明. 一种基于 SIFT 算法的图像镜像变换识别方法[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(3): 924–926.
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International J Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.