

doi:10.3788/gzxb20154405.0531002

# ITO 导电薄膜透明图案对比度增强方法

陈方涵<sup>1,3</sup>, 赵光宇<sup>2</sup>, 蒋仕龙<sup>3</sup>, 彭文达<sup>1</sup>

(1 深圳大学 光电工程学院 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060)

(2 华南师范大学 华南先进光电子研究院 光及电磁波研究中心, 广州 510006)

(3 北京大学深圳研究院 运动控制技术实验室, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 铟锡氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)导电层是触控显示技术的绝对定位元件, 为保障定位的灵敏性和准确性, 需对导电层表面缺陷进行质量检测. 本文针对导电层透明区域机器视觉自动检测存在的问题, 提出了图案对比度增强的方法. 该方法首先利用 ITO 材料的光谱属性及其表面光学特性, 设计出用于 ITO 导电层检测的近红外同轴光照明, 将图像对比度从零提高到 4.5%. 在通过光学方法实现了对比度从无到有的转变后, 充分利用数字图像预处理的优点, 结合基于小波变换的非线性增强方法, 最终成功将对比度提高至 16%, 为后续 ITO 导电层缺陷的分析和识别提供了良好保障.

**关键词:** 机器视觉; 小波变换; LED 照明; 表面缺陷; 图像增强; 透明导电薄膜; 缺陷识别

中图分类号: O439; TN307

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0531002-5

## Contrast Enhancement Method for Transparent Pattern of Indium Tin Oxide Conductive Film

CHEN Fang-han<sup>1,3</sup>, ZHAO Guang-yu<sup>2</sup>, JIANG Shi-long<sup>3</sup>, PENG Wen-da<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Devices and System of Ministry of Education and Guangdong Province, College of optoelectronic engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

(2 South China Academy of Advanced Optoelectronics, Center for Optics and Electromagnetic Research, South Normal China University City Campus, Guangzhou 510006, China)

(3 Laboratory of motion control Technology, PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

**Abstract:** ITO conductive layer is the absolute location components in touch display technology. It is necessary to inspect the surface defects of ITO layer for guaranteeing the sensitivity and accuracy of touch operation. According to the issue existing in inspecting transparent area of ITO layer automatically based on machine vision technology, a method used for enhancing contrast of pattern on ITO layer is presented in paper. The method exploited the spectral property of ITO and its interaction with light, and a NIR coaxial light was designed to illuminate. The optical method improved the contrast of ITO pattern from 0 to 4.5%. Based on the fundamental contribution of illumination, nonlinear enhancement performed by wavelet transform was further applied. The contrast eventually increased to 16%, which provides a good reliability to analyze and recognize ITO layer defects.

**Key words:** Machine vision; Wavelet transform; LED illumination; Surface defects; Image enhancement; Transparent conductive film; Defect recognition

**OCIS Codes:** 150.3040; 100.2980; 150.2945; 100.7410

## 0 引言

ITO(Indium Tin Oxide), 即铟锡氧化物, 因其良好

的导电特性和较高的光学透过率, 是最常用于玻璃或薄膜基底的传导氧化物之一, 目前已被广泛用于工业

基金项目: 广东省引进创新科研团队计划(No. 201001D0104799318) 资助

第一作者: 陈方涵(1983-), 女, 在站博士后, 主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email: chenhan620@163.com

导师(通讯作者): 蒋仕龙(1968-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为机器视觉关键技术及其自动化应用. Email: jiang\_sl@motionwell.com

收稿日期: 2014-11-12; 录用日期: 2015-01-27

<http://www.photon.ac.cn>

产品,如显示技术、电路基片及移动通信天线等<sup>[1-2]</sup>.在电容式触控面板显示技术中,ITO 薄膜用于定位触控点的绝对位置,分为透明区域和非透明区域.其中,透明区域占据了绝大部分面积,存在具有镀膜图案的 ITO 导电层;透明区域周边则是非透明金属电极图案,用于触摸导电层时产生电流,从而计算接触点的位置.为保证 ITO 薄膜可操作、产生正确的定位信号,保护触摸屏和显示器,同时保证显示器图像的正确传递和较长的使用寿命,通常会对 ITO 薄膜进行电功能测试和表面外观缺陷测试.

目前,ITO 薄膜周边金属电极图案及透明表面划痕、斑点等缺陷的检测已逐渐采用非接触的机器视觉方法实现<sup>[3-5]</sup>.对于透明 ITO 导电层的性能,则通过电容值测试判定不良率.然而,电容测试是一种整体功能评判方法,存在一些问题.例如,无法保证因细微加工缺陷带来的对定位精度和使用寿命存在的潜在影响;无法将测试结果与缺陷类别建立起相互关系,优化生产过程与合格率等.因此,为最小化缺陷的出现几率,基于机器视觉的 ITO 透明图案缺陷自动检测便成为行业的发展趋势和长远需求.

机器视觉方法通过获取和分析图像信息<sup>[6-7]</sup>,将 ITO 导电层图案的不规则形状转化为具体数值进行自动缺陷判定,其关键及首要任务就是获取足够对比度的导电层图案.但是,ITO 薄膜的应用需求赋予了其高光学透过率的透明特性,不易获取对比度图像,为缺陷的后续自动判定带来了困难.本文针对这一具体问题,分别从照明设计和图像处理两个方面入手,对 ITO 薄膜透明图案对比度的增强方法进行研究,为缺陷的自动化检测提供可靠的判定依据.

## 1 机器视觉图像对比度

基于机器视觉的触控 ITO 薄膜导电层缺陷检测,将导电层的缺陷转化为直观定量的图像与数值结果.典型的缺陷有开路、短路、针孔、突出、凹陷、图案异常.与其他机器视觉系统一样,该系统包括图像采集、图像处理与分析、应用任务等子模块<sup>[8-9]</sup>,如图 1.

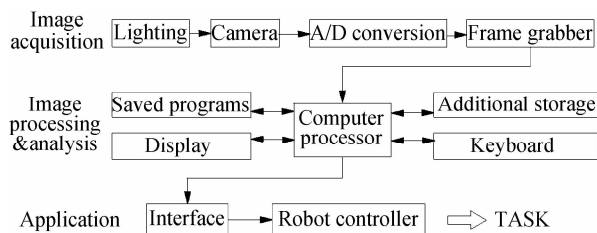


图 1 机器视觉系统模块

Fig.1 Machine vision system modules

整个系统中图像采集是第一步,主要包括光源、成像镜头、探测器等组成元件,最终目的是利用光学原理将待测目标转化为软件可识别的对比度图像.所有机

器视觉的成功应用都离不开对比度,图像探测器上采集到的良好的对比度图像是一切应用分析软件运作的基础,没有对比度就意味着没有信息.人眼感知对比度的标准定义为

$$K = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (1)$$

$K$  为人眼感知对比度; $L_{\max}$  为图像最大照度; $L_{\min}$  为图像最小照度.

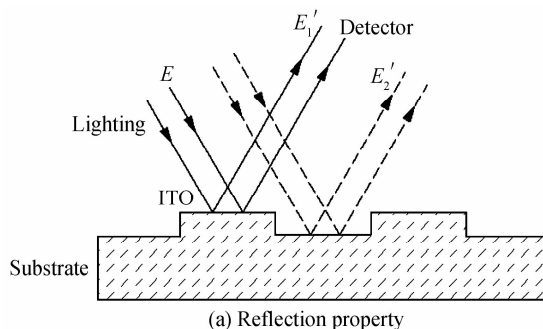
在数字化的解读中,图像对比度还有另一个定义  $K_{\text{dig}}$ ,即为某一区域的灰度差绝对值,其表达式为

$$K_{\text{dig}} = G_{\max} - G_{\min} \quad (2)$$

对比度  $K$  越高,软件的分析结果越值得信赖,而且还能简化分析算法复杂度,减少运算时间.

然而,ITO 导电膜层在可见光波段的透过率约 90%,有的甚至高达 95%,人眼或普通的光学图像采集系统无法观察到透明基底上的 ITO 电路图案,更不用说检测图案的缺陷<sup>[10]</sup>.从本质上讲,这正是由于 ITO 图案与基底没有产生足够的能被探测器区分的对比度.

在图像采集过程中,影响对比度的因素很多,如物体本身的对比度、物体的光谱响应、照明方式、成像光学系统像质、探测器类型及杂散光等.其中,在物体自身对比度无可改变的前提下,照明设计的好坏是影响对比度的直接因素.通常,最简单最直观地获取对比度的方法是利用背景和特征的颜色差异.但是,当背景和特征都是透明的,就要从物体的材料光谱特性入手.当频率为  $\nu$ 、能量为  $I$  的一束光从一种介质照射到另一种介质时,会产生反射光能  $R$ ,吸收光能  $A$  和透射光能  $T$ ,在不考虑荧光效应的前提下, $I = R + A + T$ .利用不同材料与相同频率光波之间相互作用后产生的  $R$ ,  $A$  或  $T$  值差异,便能形成对比反差.图 2 分别给出了利用反射和透射特性时,照明光经 ITO 导电层和基底后不同的光路情况(图中凸起的部分代表 ITO 导电层,凹陷的部分为镀膜基底).假设均匀照明光的照度为  $E$ ,经 ITO 和基底反射后,由于两者对频率  $\nu$  的光反射率不同,因此在探测器方向观察到的光照度分别为  $E'_1$  和  $E'_2$ ,且  $E'_1 \neq E'_2 < E$ ,如图 2(a).从而可计算出此时的图案对比度为: $K_r = |E'_1 - E'_2| / (E'_1 + E'_2)$ .同样的,当利用透射特性时,均匀照明光  $E$  经过 ITO 和基底后,照度分别为  $E'_3$  和  $E'_4$ ,且  $E'_3 \neq E'_4 < E$ ,如图 2(b).此时的图案对比度为  $K_t = |E'_3 - E'_4| / (E'_3 + E'_4)$ .



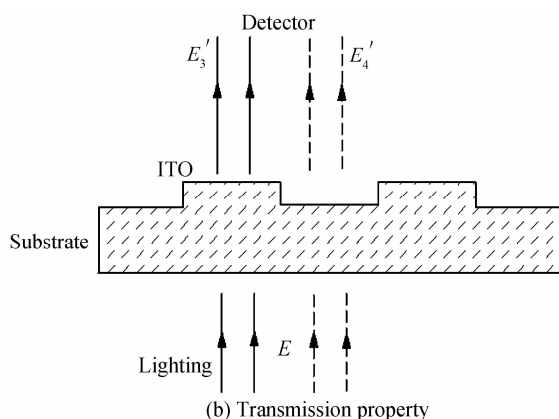


图 2 入射光在物体表面的相互作用

Fig. 2 Interaction between light and object surface

通常情况下  $K_r \neq K_t$ , 两者的值由照明工作波长和照明方式决定. 照明方式就是合理分布物体、照明、相机三者之间的几何位置, 大致可分为正向照明和背向照明. 前者的照明和相机与物体在同一侧, 如图 2(a) 所示; 后者的照明和相机分别在物体的两侧, 如图 2(b) 所示. 即便如此, 也没有一种照明方式适用于大多数或是所有光学检测, 而需要根据感兴趣的特征个别设计, 从而造就了照明的多样性与复杂性<sup>[11]</sup>.

## 2 ITO 图案缺陷检测照明设计

为了获取较好的图像对比度, 便于 ITO 薄膜透明导电层图案的缺陷识别, 所需照明设计应包括工作波长和照明方式的确定. 由于 ITO 材料在 UV 波段的吸收率最高可达 85%, NIR 波段的反射率最高可达 70% 具有吸收 UV 光反射 NIR 光的特点<sup>[12]</sup>, 因此利用非可见的 UV 或 NIR 波段照明, 均能使电路图案和背景在探测器上产生一定的灰度差异, 形成对比度. 并且从理论上分析, UV 波段照明产生的对比度相比 NIR 波段会略高. 然而, UV 光的波长在 380nm 以下, 绝大多数普通的 CCD 和 CMOS 芯片在这个波段几乎没有响应, 采用 UV 照明就意味着配备价格不菲的 UV 专用相机和成像镜头. 本文从成本和照明效果综合考量, 选取 940nm 的 NIR 光作为工作波长, 从而确定了照明将利用 ITO 薄膜的反射特性, 采用正向同轴照明方式.

相同的电流和功率下, 普通 NIR 光源的辐射能相对可见光波段较弱. 为了保证照明的能量, 本文采用 OSRAM 的 SFH 4725S 高功率 LED 作为照明光源. SFH 4725S 在标准电压下, 辐射能标准值  $\Phi_e$  可达 990mW, 是同一波段普通 NIR LED 辐射能的数十倍. 图 3 给出了在 Tracepro 软件中建立的照明光路模型, 由于被照明图像域最终由探测器接收, 因此该模型除了照明光路外, 还建立了成像光路部分. LED 辐射的光能量相继经过照明透镜和  $T/R=50/50$  的半反半透镜后会聚照明被测表面; 之后被测表面反射的光经成

像镜头, 在探测芯片上形成图案. 为了保证照明的均匀性, 减少因照明不均匀引起的检测误差, 模型中采用了远心结构的成像系统.

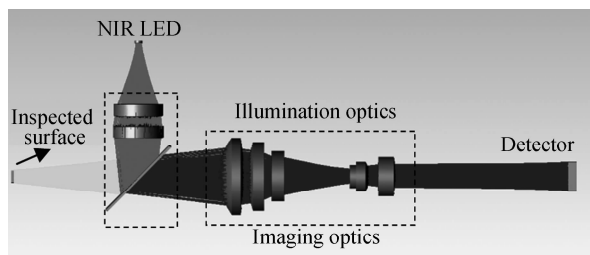


图 3 照明设计 Tracepro 模型

Fig. 3 Tracepro model of illumination design

基于图 3 建立的模型, 在假定物体表面是理想镜面反射的前提下, 分别以物体表面和探测器成像面作为分析接收面, 用于评估照明设计, 其结果如图 4 和图 5 所示. 其中, 图 4 和图 5 的横、纵坐标用以表征分析平面上各接收点的位置, 整个坐标范围为接收面的实际几何尺寸; 每个坐标点上有对应的辐射照度值, 各点接收的辐射照度变化程度会直接影响照明的均匀性. 模拟结果表明, 物体表面的辐射照度均匀性大于 90%, 经光学系统成像后, 在探测器平面上仍保持在 90% 以上, 适用应用需要.

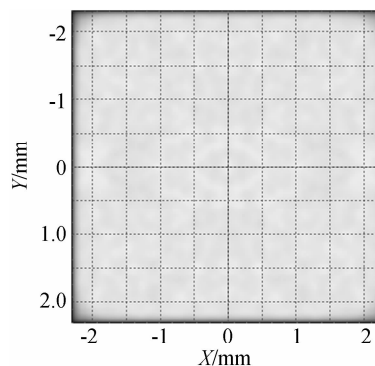


图 4 待测表面辐射照度分布

Fig. 4 Radiant illumination on inspected surface

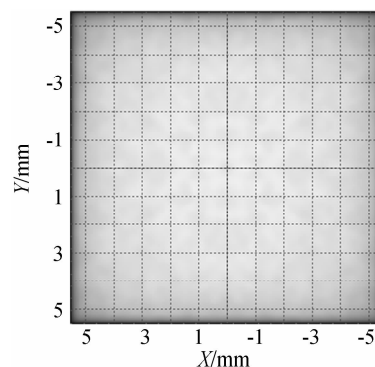


图 5 探测器成像面辐射照度分布

Fig. 5 Radiant illumination on detector

为了验证照明设计在 ITO 透明电路缺陷检测中的实际效果, 本文分别基于白光同轴照明和 NIR 同轴

照明,采用 130 万像素的 1/3 英寸 CCD 和放大倍率约 0.04X 的工业镜头采集了被测薄膜表面上的图像信息,如图 6 所示.虽然所获图像的分辨率仅约 0.1mm,无法观察到细微缺陷,但却足以进行照明效果的研究分析.

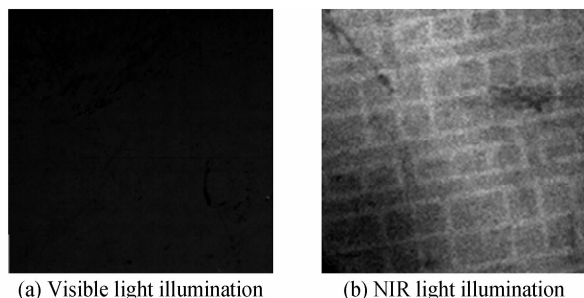


图 6 不同波长照明图案对比

Fig. 6 Comparison of patterns illuminated by different spectra

从图 6(a)给出的白光同轴照明结果来看,薄膜表面的一些污迹清晰可见,但除此之外几乎观察不到任何特征图案.相反,图 6(b)所示的图像中能看到偏白色的“网格”状图案,这便是 ITO 导电层图案,偏灰色的背景则是透明基底.缺陷检查的任务其实就是根据获取的图像,分析网格图案与应用要求的一致性,例如图案是否断开、连通、变形或者有裂痕等.从两幅图给出的照明效果看,基于 NIR 波段的照明设计明显优于可见光,为缺陷分析提供了对比度图像.然而,ITO 导电层薄膜图案是在透明基底上蚀刻完成的,由于膜层导电率和光学透过率存在一定的矛盾关系,即当导电率性能优异时,导电膜层非常薄.因此即便利用 ITO 薄膜的反射特性,其导电层图案和背景之间的灰度值反差也十分有限.按照式(1)计算出图 6(b)的图案对比度约 4.5%,属于典型的低对比度图像.

### 3 低对比度图像增强预处理

为保证缺陷识别的可靠性和准确度,应用希望能在 NIR 照明贡献的基础上,通过图像预处理进一步提高对比度.图像对比度增强的方法很多,有的直接根据空间域的灰度信息<sup>[13-14]</sup>,对各像素的灰度值进行不同程度的调整;有的则是将图像转化到频率域,针对不同频率特性分别处理,然后再逆转化为空间图像<sup>[15-16]</sup>.不论是哪种方法,其最终目的都是为了突出感兴趣的目标特征,抑制背景的干扰.

本文采用基于小波变换的非线性多尺度图像对比度增强方法<sup>[17]</sup>.首先将图像进行  $N$  层小波变换,得到的各个高频子带图像通过非线性函数  $MAG(x)$  进行调制.假设  $f(x, y)$  为原始图像,  $f'(x, y)$  为增强后的图像,则两者与非线性增强函数之间的关系为  $f'(x, y) = MAG\{f(x, y)\}$ .此处选用

$$MAG(x) = \begin{cases} k \cdot x, & |x| < T; \\ a[\text{sigm}[c(x-b)] - \text{sigm}[-c(x+b)]], & |x| \geq T \end{cases}$$

$$\text{其中, } a = \frac{1}{\text{sigm}[c(1-b)] - \text{sigm}[-c(1+b)]},$$

$$0 < b < 1, \text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + e^x};$$

$T$  为待处理各子带的增强阈值,  $k$  为常数因子,  $b$  和  $c$  分别用于控制阈值大小和增强的速率.图 7 给出了  $b=0.2, c=25$  时的  $MAG(x)$  函数曲线.利用该曲线函数进行基于 sym4 小波变换的非线性多尺度增强处理后,图像的对比度由原来的 4.5% 提高到 16% 左右,如图 8(b)所示.相比较而言,图 8(a)给出的基于空域灰度拉伸的图像对比度增强方法效果却不太明显,其对比度与图 6(b)相差无几,从而更加体现出小波变换增强方法的优势.

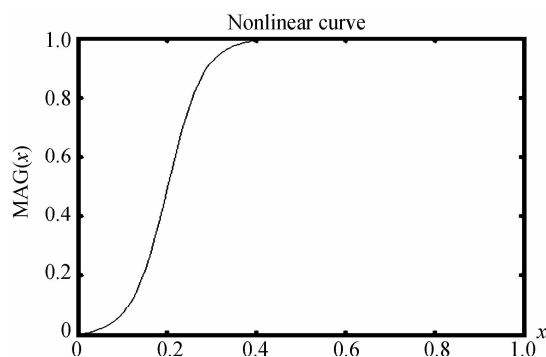
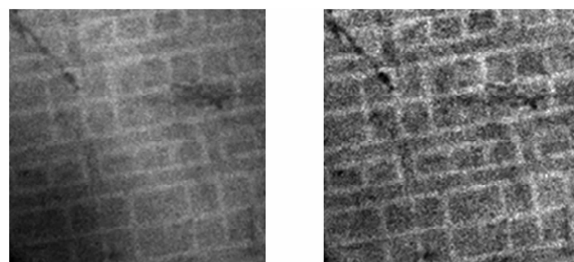


图 7 非线性增强函数曲线

Fig. 7 Nonlinear enhancement function curve



(a) Contrast enhancement by gray stretch (b) Contrast enhancement by wavelet transform

图 8 不同对比度增强方法对比

Fig. 8 Contrast enhancement comparison by different methods

### 4 总结

基于机器视觉的触控面板 ITO 薄膜图案自动缺陷检测已成为行业发展的必然方向,由于 ITO 薄膜的透明特性,在可见光照明下图案对比度几乎为零,不利于缺陷的识别.本文针对薄膜图像采集存在的问题,提出了照明设计与图像预处理相结合的对比度增强方法.经 NIR 同轴光照明后,透明图案的对比度提高到约 4.5%,实现了从无到有的转变.在此基础上,结合数字图像处理的优势,采用小波变换非线性多尺度图

像增强方法,将所采集图像的对比度提高至约 16%。当然,为保障图案缺陷识别的可靠性和准确性,对比度图案的成功获取只是第一步,有关的后续工作还将相继展开。比如设计能分辨细微缺陷的成像系统,评估快速图像采集过程中的照明光能量问题,以及用于不同类型缺陷判定的图像分析方法研究等。这些工作的完成将会大大提高机器视觉 ITO 薄膜图案自动缺陷检测应用的工程意义与实际价值。

#### 参考文献

- [1] ZHOU Hong-ming, YI Dan-qing, YANG Xiao-ling. Technology survey and development tendency investigation on ITO films[J]. *Surface Technology*, 2006, **35**(1):1-4.  
周宏明,易丹青,杨小玲. ITO 薄膜的生产技术概况及发展趋势探讨[J]. 表面技术, 2006, **35**(1):1-4.
- [2] XI Zhu-you, XU Qi-ming, ZHAO Peng, et al. Review of the characteristics of ITO thin film and its development [J]. *Journal of Xi'an University of Arch & Tech (Natural Science Edition)*, 2004, **36**(1):109-112.  
袭著有,徐启明,赵鹏,等. ITO 薄膜特性及发展方向[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, **36**(1):109-112.
- [3] CHEN Yen-chung, YU Jiun-hung, XIE Mu-chiau, et al. Automated optical inspection system for analogical resistance type touch panel[J]. *International Journal of the Physical Science*, 2011, **6**(22): 5141-5152.
- [4] SHEN Gan-song, YE Yu-tang, LI Chang-hai. A high resolution detection system for ITO lines [J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(1):24-27.  
沈淦松,叶玉堂,李昌海. 一种高分辨率 ITO 线路缺陷检测系统[J]. 激光技术, 2013, **37**(1):24-27.
- [5] XU Wei, YE Yu-tang, LIU Lin, et al. Design of special composite light system for ITO glass of LCD screen appearance inspection [J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, **20**(24):181-187.  
徐伟,叶玉堂,刘霖,等. 液晶屏 ITO 玻璃外观检测特殊复合光源照明系统设计[J]. 电子设计工程, 2012, **20**(24):181-187.
- [6] LIN Hong-da, TSAI Huan-hua. Automated quality inspection of surface defects on touch panel [J]. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2012, **29**(5):291-302.
- [7] PERNG Der-baau, CHEN Su-han. Automatic surface inspection for directional textures using nonnegative matrix factorization [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, **48**(5): 671-689.
- [8] SONG Jun-yeob, PARK Hwa-young, KIM Hyun-jong, et al. Development of defect inspection system for PDP ITO patterned glass [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2006, **7**(3):18-23.
- [9] ZHANG Hong-tao, DUAN Fa-jie, DING Ke-qin, et al. Development of key technology on surface defects detection system for steel strip[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3):26-219.  
张洪涛,段发阶,丁克勤,等. 带钢表面缺陷视觉检测系统关键技术研究[J]. 计量学报, 2007, **28**(3):26-219.
- [10] YANG Meng, DIAO Xun-gang, SUN Yi, et al. Transparent microwave absorption properties of ITO film[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2006, **12**(5):465-468.  
杨盟,刁训刚,孙裔,等. 氧化锡(ITO)薄膜的透明吸波特性研究[J]. 功能材料与器件学报, 2006, **12**(5):465-468.
- [11] QU Xiang-hua, HE Ying, HAN-Feng, et al. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):547-551.  
曲兴华,何莹,韩峰,等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(5):547-551.
- [12] ZHOU Ping, HUANG Yu-yong, LIN Yu-xiang, et al. Characteristics analyze of ITO films developed by two method in infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 985-988.  
周平,黄昱勇,林宇翔,等. 两种方法制备 ITO 薄膜的红外特性分析[J]. 光子学报, 2002, **31**(8):985-988.
- [13] LI Xu-hui, CI Lin-lin, HU Shuang-yan, et al. Research on the low-contrast image enhancement[J]. *Microelectronics & Computer*, 2008, **25**(6):71-73.  
李旭辉,慈林林,胡双演,等. 低对比度图像增强算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, **25**(6):71-73.
- [14] WU Zhi-guo, WANG Yan-jie. An image enhancement algorithm based on histogram nonlinear transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4):755-758.  
武治国,王延杰. 一种基于直方图非线性变换的图像对比度增强方法[J]. 光子学报, 2010, **39**(4):755-758.
- [15] ZHANG Xin-ming, SHEN Lan-sun. Image contrast enhancement by wavelet based homomorphic filtering [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, **29**(4):1-3.  
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):1-3.
- [16] WU Ying-qian, SHI Peng-fei. Approach on image contrast enhancement based on wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1):4-7.  
吴颖谦,施鹏飞. 基于小波变换的低对比度图像增强[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(1):4-7.
- [17] ZHANG Chang-jiang, FU Meng-yin, JIN Mei, et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transform [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **23**(2):119-124.  
张长江,付梦印,金梅,等. 一种红外图像对比度增强的小波变换法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(2):119-124.