

文章编号: 0253-2239(2005)09-1195-6

基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术

宋丽梅 周兴林 徐可欣 曲兴华 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了对缺陷进行更加全面的判断,设计了一种新型三维缺陷检测方法,只需要根据单幅实时测量的工件图像,就可获得 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内工件形貌的三维数据,进而对缺陷的平面及深度尺寸进行全面判断。其核心技术是根据单幅测量图像中留下的三维线索—灰度信息,进行亮度分析和转换,利用倾角和偏角计算物体深度信息。在工业现场磁性材料缺陷检测中,该方法在 X 和 Y 方向的分辨力达到 0.1 mm , Z 方向的分辨力达到 0.007 mm 。实验证明所使用的三维缺陷检测方法,工作方式简单,硬件成本低,处理速度快,精度高,适宜在工业现场应用。

关键词: 光学测量; 三维光学缺陷检测; 基于阴影恢复形貌; 灰度; 倾角; 偏角

中图分类号: O438 文献标识码: A

Three-Dimensional Defect Detection Based On Single Measurement Image

Song Limei Zhou Xinglin Xu Kexin Qu Xinghua Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: In order to acquire overall three-dimensional (3D) defect information, a new 3D defect detection method is designed. It only needs single image captured from real-time measurement line. From the single image, 3D data of the work piece shape ranged from 0° to 180° can be got. Moreover, it can give an overall recognition of plane dimensions and depth information of the defect. The key technique is made use of the 3D clues—"shading value", which left in the single measurement image, to process luminance analysis and conversion, thus to calculate the depth information by slant and tilt. In the application of defect detection for magnetic work piece, the resolution in X and Y direction can reach 0.1 mm , and the resolution in Z direction can reach 0.007 mm . This experiment proves that the designed 3D defect detection method has the merits of simple operation, low cost, high speed and high precision. This 3D method is fit to use in industrial application.

Key words: optical measurement; 3D optical defect detection; shape from shading; tonal value; slant; tilt

1 引 言

缺陷检测技术是提高产品质量的有力保证,对于减少或避免因缺陷引起的意外事故有积极的作用。传统的人工缺陷检测方式因速度慢,操作人员环境受限制,工作易疲劳等因素,必将逐步被高精度的自动化缺陷检测技术所替代。据文献报道,国内外已经利用各种手段进行缺陷检测的研究。主要使用的缺陷检测技术有:涡流检测技术^[1]、漏磁检测技术^[2]、红外检测技术^[3]、X射线及超声波^[4]、视觉检测方法^[5]。其中,计算机视觉检测方法是近年来国内外研究的热点。2003年,国内华中科技大学控制

科学与工程系利用机器视觉中区域分析和特征提取技术,建立带钢表面缺陷检测系统^[6],通过调控光源及摄像机角度,对同一块检测区域进行明域及暗域的图像采集,可在明域中检测油斑、水迹、污印等,在暗域检测轻微划伤、磨损。该研究仍属于平面检测领域,无法获得缺陷的深度信息。

本研究关注的是物体三维全貌的缺陷检测,并不是抽取部分检测点或者部分检测面的局部检测。三维形貌的全面测量已经成为计量领域一个新目标。目前虽有很多关于三维形貌恢复的研究,但是多数研究仍处于实验室研究阶段,并且因为精度、测

作者简介: 宋丽梅(1976~),女,天津大学博士后,主要从事光学设计、图像信息处理及三维缺陷检测的研究。

E-mail: lilymay@eyou.com

收稿日期: 2004-10-25; 收到修改稿日期: 2005-01-24

量范围、工作条件、操作过程的限制,不易应用到自动化生产线上,也没有成型的三维缺陷检测产品。国内外已有的三维形貌恢复方式中,基于阴影恢复形貌(Shape from shading, SFS)三维恢复方法是一种简单且易应用到工业现场的方法。但是目前对于该方法的研究尚处于起步和有序阶段,而且精度也有待提高。

本文基于 SFS 方法的基本设计思路,进行了光源系统及三维处理算法的改进,大大提高了三维恢复的精度,并将之应用到某公司磁性材料三维缺陷检测上。

2 原理分析

计算机的图像中含有各种信息,如亮度、轮廓、纹理、特征点等。在人眼的形状识别系统中,图像灰度发挥着非常重要的作用。19 世纪 70 年代,由 MIT 的 Horn 等^[7]首先提出从单幅图像恢复物体形状的问题——SFS 问题,开辟了基于单幅图像进行三维形貌恢复的先河,但是该研究尚未获得比较高的三维恢复精度。后续诸多学者对之进行研究,大部分学者认为该方法是一种有前景的三维恢复研究方法,并在精度上逐步提高^[8]。

本研究从影响灰度的因素出发,找出图像灰度与物体表面法矢的关系,进而得到物体表面的三维坐标。与前人对 SFS 方法的研究相比,本研究运算更简洁,方便,且在三维形貌恢复精度上有比较大的提高。

采集图像的灰度与物体可见表面的几何形状、光源的入射强度和方向、观察者相对物体的方位和距离、物体表面的反射特性 4 个因素有关^[9],如图 1 所示。

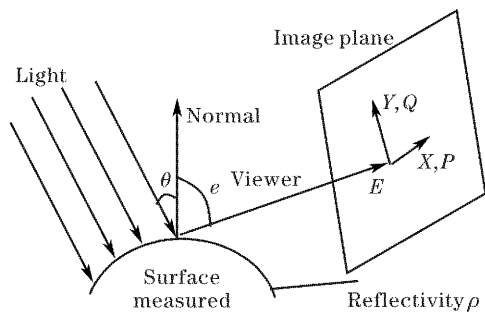


图 1 影响图像灰度的 4 个因素

Fig. 1 Four factors affecting image shading

假设沿观察者方向的视线与成像的 XY 平面垂直相交,设梯度坐标系 (P, Q) 与像平面坐标系

(X, Y, E)重合。设光源的强度为 $I(x, y)$,光源向量为 $[p_i, q_i, -1]$,物体表面法矢为 $[p, q, -1]$,角度 θ 为光源矢量与表面法矢的夹角。则法矢 N 的反射强度可表示为

$$E(x, y) = I(x, y)\rho \cos \theta, \quad (1)$$

在内积空间中,任意两个非零向量 x 与 y 的夹角 α 可由(2)式确定^[2]:

$$\cos \alpha = \frac{x \cdot y}{|x| |y|}, \quad (2)$$

入射光与表面法矢的夹角余弦可表示为

$$\cos \theta = \frac{pp_i + qq_i + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_i^2 + q_i^2 + 1}}, \quad (3)$$

则图像灰度可以表示为

$$E(x, y) = I(x, y)\rho \frac{pp_i + qq_i + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_i^2 + q_i^2 + 1}}, \quad (4)$$

根据(4)式,可以得到一个重要结论:图像中最亮点的表面法矢指向光源方向。

将三维曲面方程表示为显函数形式,即 $z = f(x, y)$,并设 $f(x, y)$ 是有界闭区域 Ω 上的有界函数,且 $f(x, y)$ 在任一点的偏导数 f_x, f_y 均连续,则三维形貌恢复可以通过下列四种方式表达^[10],如图 2 所示。

- 1) z (depth) 值。即根据 x, y 求出每个点的深度值 z 。
- 2) 表面点法矢,即 $[n_x, n_y, n_z]$ 。对于曲面 $z = f(x, y)$,表面法矢可以表示为 $(f_x, f_y, -1)$ 。
- 3) 表面梯度,即 $[p, q]$ 。
- 4) 倾角 ϕ (纬度) 和偏角 θ (经度)。

若以光源方向为 Z 轴建立坐标系,由(3)式可知,图像上任意点 i 的表面法矢与光源方向的夹角 ϕ_i 的值可从(5)式获得:

$$\phi_i = \arccos(E_i/E_{max}). \quad (5)$$

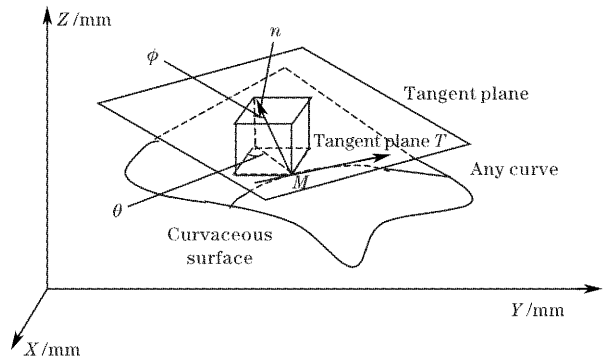


图 2 曲面上的任一条切线和法线图

Fig. 2 Tangent plane and normal plane in curved surface

若入射光强度恒定,表面反射系数为常数,则在一次测量中, I 和 ρ 的值为常量,可将之视为比例

常数,暂时不考虑。将以倾角和偏角形式表示的 p_i, q_i, p_i, q_i 带入反射亮度公式,可表示为

$$E_i = \frac{\tan \phi_s \cos \theta_s \tan \phi_i \cos \theta_i + \tan \phi_s \sin \theta_s \tan \phi_i \sin \theta_i + 1}{\sqrt{\tan \phi_s^2 \cos^2 \theta_s + \tan \phi_s^2 \sin^2 \theta_s + 1} \sqrt{\tan \phi_i^2 \cos^2 \theta_i + \tan \phi_i^2 \sin^2 \theta_i + 1}} \quad (6)$$

若物体表面不存在尖峰突变,则可对物体任意局部形状做球形假设。根据假设可以获得(7)式

$$d\phi = \frac{\sin \phi \cos \theta dx + \sin \phi \sin \theta dy}{r \sin \phi \cos \phi}, \quad (7)$$

对(6)式进行求导运算,并将(7)式的内容带入求导过程中,可以得到(8)式:

$$\theta = \arctan \frac{I_y \cos \theta_s - I_x \sin \theta_s}{I_x \cos \theta_s \cos \phi_s + I_y \cos \phi_s \sin \theta_s}, \quad (8)$$

(5)式和(8)式分别得到了物体任意点的倾角和偏角,根据倾角和偏角即可获得曲面三维尺寸。

3 硬件系统设计

基于单幅图像进行三维形貌恢复在硬件设计方面一个最突出的特点就是简单且低成本。系统硬件环境包括:光学系统、图像采集系统及计算机。系统结构示意图如图3所示。

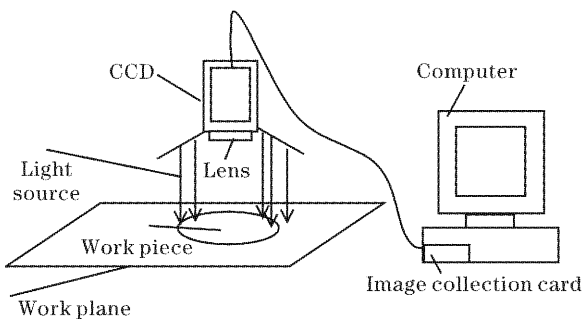


图3 硬件系统示意图

Fig. 3 Sketch of hardware system

平行光是本研究中的理想选择,但是由于现有平行光产品测量口径小,价格昂贵,所以本研究采用自行设计的“圆台型LED照明系统”^[11],该系统光路如图4所示。圆台型的光源希望能模拟球面,使得被测物位于光源照明的焦点位置,获得均匀一致的照明。围成圆台形的电路板上密排着5圈发光二极管,假设二极管的发光角都接近于零。则透过磨砂玻璃的光线必定在工作区域上汇集在一起,在工作区域平面上,光强分布比较均匀,如果将工件置于这个平面上,可获得较好的照明。则光源到这个平面的距离为

$$H = (R + r) \times \cot \beta, \quad (9)$$

根据几何关系,可知 $\beta = \alpha$,所以

$$H = (R + r) \times \cot \alpha, \quad (10)$$

其中 r 为电路板围成的圆台的上底半径, R 为光线汇集的工作区域平面的半径, H 为光源上端到工件平面的距离。如果确定好工件到光源的距离 H ,在满足 r 大于CCD镜头的半径的条件下,就可以设计电路板的倾角和半径了。

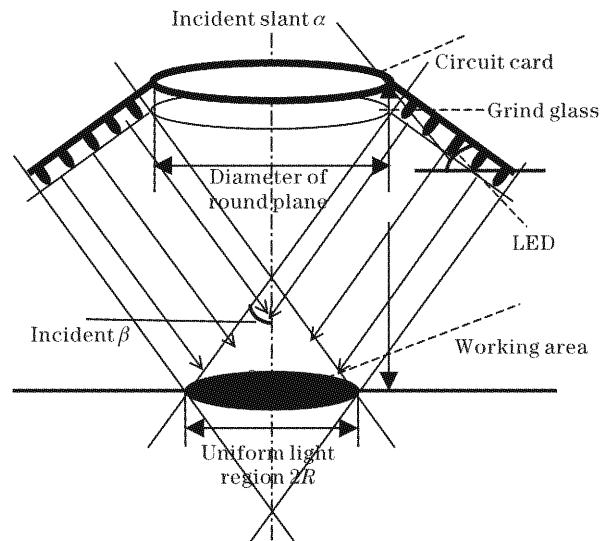


图4 圆台形LED光源的光学原理图

Fig. 4 Optic principle of LED light in round plane

本研究所使用的光源系统稳定性好,亮度均匀,成本低,且可通过对供电电压的调整而改变发光亮度。光电传感器及图像采集系统为台湾敏通公司生产的MTV-1881EX黑白摄像机作为图像采集设备,也可使用数码摄像机作为图像采集设备。对采集设备与工件的距离没有严格的要求,只要能够将被测图像采集清楚即可进行测量。

4 三维缺陷检测应用实例

在线形貌检测是提高产品质量的有力保证,但是由于检测手段及工作环境的限制,目前很少有应用于工业现场的三维形貌检测。本研究因设备简单,安装容易等优点,可应用到工业现场,对工件进行尺寸及

缺陷检测。如在磁性材料加工过程中,材料的缺陷必须及时检测并剔除。在工业现场建立自动三维缺陷检测生产线如图 5 所示。为了避免工厂内部的杂散光(如电弧焊光等)对测量图像产生噪声,可以在适当的检测部位,用黑布围成一个暗室,在此暗室实现工件的三维缺陷检测。若发现检测图像仍然存在部分噪声,可采用图像处理技术,如图像平滑、线性变换等对图像进行预处理,最大程度地滤除噪声。

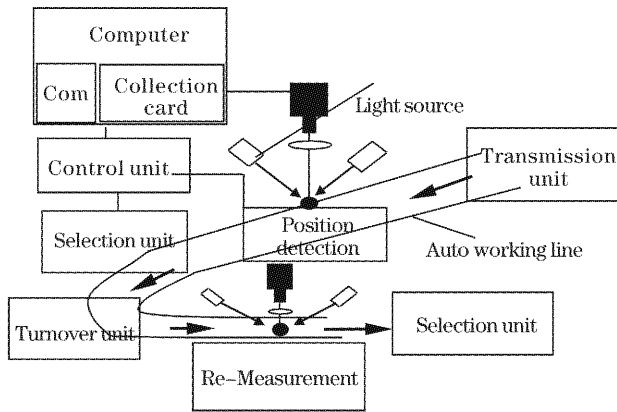


图 5 三维缺陷检测自动检测图

Fig. 5 Auto three-dimensional defect detection system

在检测之前,先调整好摄像机状态、光源和软件参量设定,通过上料装置将工件逐个送到流水线上,当工件到达 CCD 采集图像范围内时,通过位置检测开关通知主程序“工件已到”信息,主程序开始采集工件图像,并对采集的图像进行三维形貌恢复,判断每个点的表面厚度是否与理想厚度存在较大偏差,进而判断是否存在缺陷,决定是否要通知分选机构分选,若不分选,则由翻转机构翻面后,进行反面的检测。反面的检测和正面的类似,如果有缺陷则进行分选,否则,送入无缺陷的工件盒中。

在工业现场拍摄的单幅工件照片如图 6 所示。用肉眼可以从图中看出缺陷的位置和形状。目前,

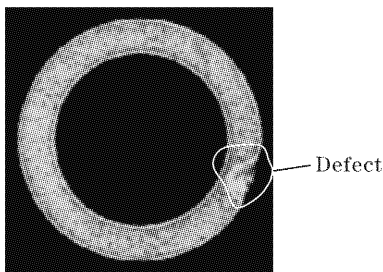


图 6 单幅磁性材料工作图

Fig. 6 Single image of magnetic work piece

采用平面图像处理技术^[12],如二值法等,可以大致得到缺陷的平面尺寸,缺陷的深度信息却无法获得。

利用本文所述的基于单幅测量图像三维形貌恢复方法对其进行三维形貌恢复如图 7 所示。工件的平面尺寸及高度尺寸均已获得。由于图 5 共有 128×128 个像素,其外形尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm,所恢复的三维图像将 X,Y 方向尺寸分别细分为 128 等分,那么 X 和 Y 的分辨力均为

$$20/128 \approx 0.156 \text{ mm}$$

X,Y 平面分辨力为

$$\frac{20 \times 20}{128 \times 128} \approx 0.024 \text{ mm}^2$$

Z 方向的分辨力由灰度级别决定,由于本研究所采用的图像系统的灰度等级为 256 级,则 Z 方向的分辨力为

$$\frac{2}{256} \approx 0.0078 \text{ mm}$$

图 7 共有 128×128 个测点,从三维恢复图中可以清晰地分辨缺陷的位置及形状,并可准确确定缺陷的位置和高度。截取缺陷位置部分的 80 个测点的三维数据列于表 1。此 80 个测点为 10 行 8 列,X 坐标的变化范围从 15.625~16.719 mm,Y 坐标的变化范围从 6.250~7.656 mm。Z 坐标的测值为通过三维恢复方法得到的测值。从表 1 可以清楚地看到每个测点的深度信息,此处的深度信息与标准深度信息 2 mm 差别很大,并按行呈现逐步下降的趋势,表中所列的最小深度仅为 0.186 mm,与 2 mm 标准厚度相差较大,是明显的缺陷。按照相似的方法,通过判断测点深度与标准深度的差别,可以识别每个工件是否存在深度缺陷。

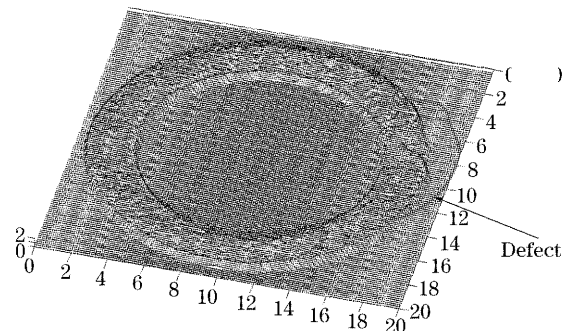


图 7 磁性材料三维形貌恢复图

Fig. 7 three-dimensional recovery of magnetic work piece

表 1 部分缺陷位置的三维数据
Table 1 A part of three-dimensional data in defect position

No.	Measurement data (X: mm, Y: mm, Z: mm)								
1	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	6.250	6.250	6.250	6.250	6.250	6.250	6.250	6.250
	Z	16.822	15.701	16.262	15.140	12.056	14.953	11.121	1.869
2	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	6.406	6.406	6.406	6.406	6.406	6.406	6.406	6.406
	Z	14.019	14.393	17.664	17.009	13.925	12.710	12.075	3.178
3	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	6.563	6.563	6.563	6.563	6.563	6.563	6.563	6.563
	Z	18.692	17.757	15.047	13.738	12.710	14.299	11.869	2.091
4	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	6.719	6.719	6.719	6.719	6.719	6.719	6.719	6.719
	Z	18.692	15.047	13.084	13.832	17.850	17.850	14.323	7.654
5	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	6.875	6.875	6.875	6.875	6.875	6.875	6.875	6.875
	Z	8.972	17.664	14.860	10.935	10.935	9.439	12.336	9.333
6	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031
	Z	9.8131	17.757	10.561	9.4393	11.682	12.991	15.514	15.981
7	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	7.188	7.188	7.188	7.188	7.188	7.188	7.188	7.188
	Z	19.252	18.411	14.299	18.692	17.009	19.346	17.383	4.579
8	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	7.344	7.344	7.344	7.344	7.344	7.344	7.344	7.344
	Z	19.439	19.626	19.252	19.159	17.757	19.720	17.477	3.925
9	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500
	Z	19.533	19.533	19.720	18.318	11.776	12.991	12.523	4.589
10	X	15.625	15.781	15.938	16.094	16.250	16.406	16.563	16.719
	Y	7.656	7.656	7.656	7.656	7.656	7.656	7.656	7.656
	Z	18.505	19.346	15.140	17.290	19.533	7.757	8.911	6.065

5 结 论

利用三维形貌恢复技术,对工件表面进行三维缺陷检测,与传统的表面缺陷检测技术相比,可以更全面的评价工件的缺陷状况。所使用的三维形貌恢复方法只需要根据单幅实时测量图像,就可重现工件 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围的三维形貌尺寸。与前人基于单幅图像的三维恢复相比,本研究方法更为简单有效,大大提高了运算速度和精度,并且工作方式简单,硬件配置只需要光源,CCD,图像采集卡及计算机,大大降低了三维恢复的成本,适宜在工业现场应用。

本文所述的三维恢复方法已经成功应用到磁性材料的缺陷检测中,对于外形尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的工件,X和Y的分辨力达到 0.1 mm ,Z方向的分辨力达到 0.007 mm ,充分满足

磁性材料的缺陷检测需求。对于提高磁性材料产品的质量有重要作用。

本文在缺陷检测过程中所使用的三维形貌恢复方法,还可广泛应用到国民经济的其他行业,如军事上的目标定位,化学实验的气泡分析,公安部门的根据照片进行人像三维识别,根据照片进行古文物的恢复和重现,模型制造及快速原型领域,生活物品三维化,文字的立体识别等领域。本方法还可作为其他三维方法的辅助分析法,应用在牙齿整型等领域,帮助进行局部地方的三维信息分析。

通过分析可知,基于单幅图像进行三维形貌恢复方法确实是一种有效且适用性广泛的研究方法。并且随着光源条件、摄像条件的继续改进,三维恢复精度会得到进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Zhuang Hongwei, Gong Qingge. A new algorithm for identifying shape of crack in eddy current testing[J]. *Modern Electronic Technique*, 2003, (10): 64~65 (in Chinese)
庄弘伟, 巩青歌. 涡流检测中缺陷形状可视化的一种新算法[J]. *现代电子技术*, 2003, (10): 64~65
- 2 Jiang Qi, Wang Taiyong, Liu QiuHong. Magnetic flux leakage signal analysis for surface defect in pipelines [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(12): 1043~1046 (in Chinese)
蒋 奇, 王太勇, 刘秋宏. 钢管表面缺陷漏磁场与漏磁信号分析[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(12): 1043~1046
- 3 Wang Yongmao, Guo Xingwang, Li Rihua *et al.*. Defect dimension and depth measurement by infrared thermography[J]. *NDT*, 2003, 25(9): 458~461 (in Chinese)
王永茂, 郭兴旺, 李日华 等. 缺陷大小和深度的红外检测[J]. *无损检测*, 2003, 25(9): 458~461
- 4 Sun Yi, Sun Hongyu, Bai Peng *et al.*. Defect online measurement in X ray welding line image[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(2): 115~118, 122 (in Chinese)
孙 怡, 孙洪雨, 白 鹏 等. X 射线焊缝图像中缺陷的实时检测方法[J]. *焊接学报*, 2004, 25(2): 115~118, 122
- 5 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 636~640 (in Chinese)
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 636~640
- 6 Li Wei, Huang Xinhua, Wang Min *et al.*. The steel surface inspection system based on computer vision[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)*, 2003, 31(2): 72~74 (in Chinese)
李 伟, 黄心汉, 王敏 等. 基于机器视觉的带钢表面缺陷检测系统[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(2): 72~74
- 7 Ruo Zhang, Pingsing Tsai, James Edwin Cryer *et al.*. Shape from shading: A survey [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(8): 690~705
- 8 Siu-Yeung Cho, Tommy W. S. Chow. A neural-learning-based reflectance model for 3-D shape reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(6): 1346~1350
- 9 Liu Zhangwen, Gu Tianxiang. Three-dimensional measurement of object by using gray gradient of CCD image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(11): 1384~1388 (in Chinese)
刘章文, 古天祥. 利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量[J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1384~1388
- 10 Wang Hui, Li Yong, Jin Hongxia *et al.*. Visualization using computer-generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 284~288 (in Chinese)
王 辉, 李 勇, 洪 霞 等. 三维面形测量数据的计算全息可视化[J]. *光学学报*, 2003, 23(3): 284~288
- 11 Qu Xinghua, 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 (in Chinese)
曲兴华, 何 滢, 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 Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 671~676 (in Chinese)
吴 艳, 杨万海, 李 明. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 671~676