

焊缝结构光图像处理与特征提取方法

赵军, 赵继, 张雷

(吉林大学机械科学与工程学院, 130022, 长春)

摘要: 为实现焊缝磨抛自动化, 将双 CCD 相机与激光器搭载于磨抛机器人上, 构成机器人视觉导航和检测系统。根据机器人与焊缝特征点之间空间位置的相关性, 构造动态感兴趣区域(ROI), 提出了一种提取焊后焊缝结构光特征线的快速算法, 该算法可将图像处理区域缩小到原来的 1.49%, 从而极大地提高了运算效率。在动态 ROI 内, 对图像进行分析, 针对焊缝结构光图像的特点, 对图像的预处理过程进行了优化, 采用动态高斯平滑模板处理直方图, 改进了阈值计算方法。在此基础上, 提取焊缝激光带的特征线, 并进行了实验研究。研究结果表明, 视觉系统稳定可靠, 提出的算法能够快速地锁定动态 ROI, 可准确地提取结构光特征线, 从而为磨抛机器人视觉导航和检测奠定了基础。

关键词: 图像处理; 结构光; 焊缝磨抛

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0114-06

Image Processing and Feature Extraction for Structured Light Images of Welded Seam

ZHAO Jun, ZHAO Ji, ZHANG Lei

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To automatically grind and polish welded seam, a binocular stereo is constructed by connecting double CCD and laser with grinding and polishing robot. On the dependency between the robot and structured light on welded seam, a dynamic region of interest(ROI) is composed, and an algorithm for quick-extracting typical line is proposed as well. This proposed algorithm enables to narrow the image processing region to 1.49% of the original one, to significantly improve the efficiency. Analyzing the image within dynamic ROI, the preprocessing is optimized according to the characteristic of quick-extracting image, and the threshold computing during binarization also improved by histogram smoothed by a dynamic Gaussian mask. Then the typical lines of structured light band are extracted and experimentally investigated. It indicates that the visual system is endowed with good reliability and stability, and the algorithm is able to quickly locate dynamic ROI and precisely extract laser featured line.

Keywords: image processing; structured light; welded seam grinding and polishing

焊接成形具有连接强度高、可靠性高和密闭性好等特点, 因此被广泛应用在轨道客车车体、轮船等大型结构件的成型连接中。目前, 还是由工人手工

来完成焊缝的磨抛加工, 由于手工磨抛焊缝不仅加工精度差、效率低, 还经常磨伤母材表面, 而且磨抛过程中产生的粉尘也会危害操作人员的身体健康,

因此实现焊缝磨抛自动化,具有较大的现实意义和理论价值。

基于激光传感的机器视觉技术由于具有精度高、可对工件进行非接触性测量等诸多优点,而被许多研究人员用于焊前焊缝的跟踪和检测过程中^[1-5]。双目视觉系统利用图像匹配来获得待测物的形状和位置信息^[6],精度高、可再现性好^[7],但由于生产实际中待加工焊缝形状极不规则,熔池和母材之间灰度的变化不大,因此采用直接匹配的方法往往难度大、耗时长。针对图像匹配困难的问题,本文将双 CCD 相机和激光器搭载在焊缝磨抛机器人上,构建了新的视觉系统模型,对左、右 CCD 相机采集到的激光带的同一特征点进行匹配,进而获得了焊缝三维信息,有效地减少了图像处理的计算量。

在计算机处理 CCD 相机采集的图像、寻找对应特征点的过程中,针对传输和处理的数据量大、耗时长、难以满足机器人磨抛焊缝实时性要求的问题,本文提出了一种基于动态感兴趣区域(ROI)的算法,当快速准确地锁定 ROI 后,在 ROI 内优化图像预处理的过程中,改进图像二值化时的阈值计算方法,成功快速地提取了焊缝结构光特征线,从而实现了特征点的快速匹配,为自动磨抛焊缝奠定了基础。

1 实验系统的组成和工作原理

机器人由视觉系统、控制系统、行走机构、加工系统等部分构成,为快速准确地跟踪焊缝和检测磨抛余量,设计了如图 1 所示的视觉系统。该视觉系统集中了双目视觉和激光测量的优点,对同一激光带特征点进行匹配,减少了特征匹配的难度和计算量,提高了焊缝跟踪和测量的效率及精度。如图 1 所示,y 方向模组带动激光器沿着焊缝方向移动,激光器垂直照射焊缝,y 方向模组每移动一个行程,2 个 CCD 相机分别采集 26 帧图像,模组行程 125 mm,采样间距(2 条相邻激光线间的距离)为 5 mm。对

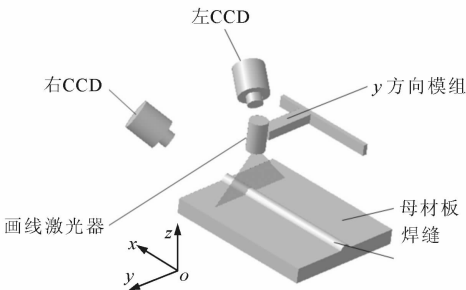


图 1 机器人视觉系统

采集的 26 帧图像依次编号,组成 26 个图像对,根据图像中的激光投影线形状,通过图像处理算法获得激光投影线单像素中心线,找到激光带中心线的转折点。

利用最大距离法计算每一组图像对的焊缝最高点的图像坐标,对计算出的对应最高点进行图像匹配和坐标变换,求取焊缝的三维信息以及焊缝最高点的机器人坐标系坐标。依据焊缝的三维信息对机器人进行导航,控制机器人进行磨抛加工。

2 定位动态 ROI

左、右 CCD 相机采集的每帧图像的大小为 $1\,628 \times 1\,236$ 像素、256 灰度级的灰度图像,若对整幅图片进行处理,不仅运算量特别大,而且会引入大量的噪音,很难满足磨抛机器人加工实时性的需求。因此,对图像选定 ROI 是必要的,选定 ROI 的目的是将待处理的图像缩减到 ROI 之内,减少处理像素的数目。这样不仅可以加快运算速度,还可以直接去除 ROI 以外的噪声干扰。理论上 ROI 越小,需要处理的数据量则越少,运算速度就越快。当选择较小的 ROI 时,ROI 就有可能无法包含完整的激光带转折点的信息,导致图像处理失败。在 y 方向模组带动激光器一起扫描焊缝的过程中,对于每一帧图像,激光带转折点的像素坐标是变化的,即激光带转折点在每一帧图像中的图像坐标都要发生变化,而选择静态的恰好包含每帧图像激光带关键点的静态 ROI,则会导致 ROI 面积过大,失去 ROI 的意义。在处理焊缝图像时,确定 ROI 的方法^[8-11]有:①根据实验情况确定较大的静态 ROI;②对整个图像使用比较简单的边缘算子进行图像处理,根据边缘信息确定 ROI。本文根据机器人与焊缝特征点之间空间位置关系的相关性,提出一种无需经过先行图像处理即可确定合理的动态 ROI 的方法,即快速动态 ROI 定位法(见图 2)。

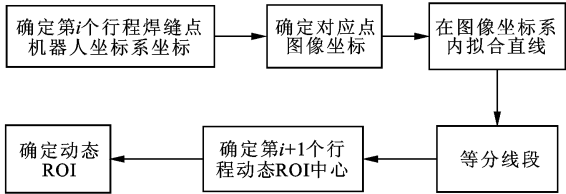


图 2 定位动态 ROI 的流程图

2.1 动态 ROI 中心的确定

磨抛机器人在加工完成第 i 段焊缝后,向前移动一个行程,第 i 段焊缝与第 j ($j = i + 1$) 段焊缝的

总长为 250 mm, 两段焊缝总体接近直线。由于机器人沿着第 i 段焊缝的方向移动, 所以第 j 段焊缝在机器人坐标系中的位置与第 i 段焊缝相比变化不大。设机器人位于第 i 段行程和第 j 段行程位置时, 各帧图像对应的焊缝最高点为 P_{ik} 和 P_{jk} ($k=1, 2, 3, 4, \dots, 26$), 点 P_{ik} 在机器人坐标系、标定板坐标系、摄像机坐标系中的坐标依次为 $P_{ik}^r = (x_{ik}^r, y_{ik}^r, z_{ik}^r)$ 、 $P_{ik}^{cp} = (x_{ik}^{cp}, y_{ik}^{cp}, z_{ik}^{cp})$ 、 $P_{ik}^c = (x_{ik}^c, y_{ik}^c, z_{ik}^c)$, 而且 P_{ik} 、 P_{jk} 在摄像机坐标系中对应坐标值的变化很小。将 CCD 相机安装在机器人上, 机器人坐标系到 CCD 相机坐标系的变换可以采用固定的齐次变换矩阵 H_3 来描述。将得到的摄像机坐标系下点 P_{ik} 转换到像素坐标系, 就可以得到点 P_{ik} 在像素坐标系中的坐标 (见图 3)。机器人的坐标变换关系为

$$H_3 = H_1 H_2 \quad (1)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} r_1 & t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} r_2 & t_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: r_1 、 t_1 为标定板坐标系相对摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵; r_2 和 t_2 为机器人坐标系相对标定板坐标系的旋转矩阵和平移矩阵; H_3 、 H_1 、 H_2 分别为机器人坐标系、标定板坐标系相对于摄像机坐标系的齐次变换矩阵以及机器人坐标系相对于标定板坐标系的齐次变换矩阵。

将标定板固定于机器人本体上, 匹配标定可以得到矩阵 H_1 。将标定板坐标系置于机器人底盘上, 可确定标定板坐标系的位姿, 将标定板坐标系沿 z 轴向下平移, 由坐标系的平移量便可以得到 H_2 。根据式 (1) 得到的 H_3 , 可以通过式 (4) 求出点 P_{ik} 在摄像机坐标系下的坐标, 即

$$\begin{bmatrix} x_{ik}^c \\ y_{ik}^c \\ z_{ik}^c \\ 1 \end{bmatrix} = H_3 \begin{bmatrix} x_{ik}^r \\ y_{ik}^r \\ z_{ik}^r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

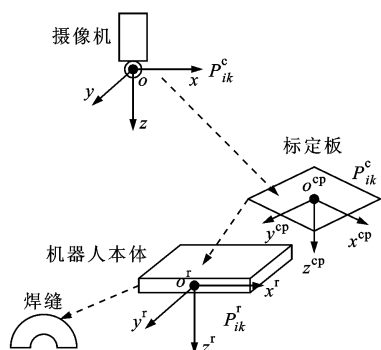


图3 机器人的坐标转换关系

根据摄像机的标定参数, 将坐标点投影到矫正后的图像平面上, 在左、右 CCD 相机的图像坐标系内得到 P 点的坐标 $P_1(v_1, u_1)$ 、 $P_2(v_2, u_2)$ 。矫正同一帧图像对, 使 P_1 、 P_2 的行坐标值相同, 即 $v_1 = v_2$ 。由矫正后的立体视觉系统模型的几何关系得到

$$u_1 = f \frac{x_c}{z_c}; u_2 = \frac{x_c - b}{z_c}; v_1 = v_2 = f \frac{y_c}{z_c} \quad (5)$$

式中: f 为镜头焦距; b 为两摄像机光学中心的距离, 即基线长; x_c 、 y_c 、 z_c 为点 P 在左摄像机坐标系中的坐标点; u_1 、 u_2 为投影矫正后的像素行坐标; v_1 、 v_2 为投影矫正后的像素列坐标。将式 (4) 求得的摄像机坐标系下焊缝点 P_{ik} 的坐标代入式 (5), 就可以得到这些点在左目和右目的图像坐标。根据式 (6) 对棱镜扭曲畸变进行矫正, 得到矫正后的图像坐标, 将式 (6) 结果代入式 (7) 便可以得到点 P_{ik} 的图像坐标

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \frac{2}{1 + [1 - 4k(u^2 + v^2)]^{1/2}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: u 、 v 为矫正前的图像坐标系列坐标值和行坐标值; k 为畸变矫正系数, 由相机标定结果得到。 u' 、 v' 为矫正后的图像坐标系列和行坐标值, 即

$$\begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'/S_y + C_y \\ u'/S_x + C_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: r 、 c 为像素坐标系的行坐标值和列坐标值; S_x 、 S_y 为坐标系在 x 、 y 方向的比例因子; C_x 、 C_y 为图像在 x 、 y 方向的主点; S_x 、 S_y 、 C_x 、 C_y 可通过摄像机标定得到。

根据坐标变换关系, 可以建立点 P_{ik} 在机器人坐标系下和像素坐标系下的对应关系。依据点 P_{ik} 在左目图像上的像素坐标, 拟合直线方程

$$y = 0.2925x + 495.0538 \quad (8)$$

取拟合直线上 P_{i1} 、 P_{i26} 为端点的线段, 将该线段等分成 25 份, 记为 N_k ($k=1, 2, 3, 4, \dots, 26$)。由于第 i 段和第 $i+1$ 段焊缝整体近似直线, 对每段焊缝采样时, 采样间隔相等, 且一个行程采集 26 帧图像, 所以第 i 段焊缝上计算得到的图像坐标 N_k ($k=1, 2, 3, 4, \dots, 26$), 与第 $i+1$ 段焊缝上对应的 26 帧图像上激光带中心线处的焊缝最高点的像素坐标相差很小。以 N_k 为中心, 构造大小为 200×150 像素的动态 ROI, 在 ROI 内处理第 $i+1$ 段焊缝图像。这样, 动态 ROI 面积仅为每帧整幅图像面积的 $1/67$, 待处理图像的面积将缩小到原来图像面积的 1.49% 。

2.2 图像预处理

焊缝图像预处理一般要经过灰度变换、中值滤

波等处理过程,目的是消除图像在采集、传输过程中产生的噪音,使图像变得清晰,边缘更加整齐、明显,为下一步提取焊缝边缘和中心线打下必要的基础。为了后续对焊缝进行三维重构,本文采用双目视觉系统对焊缝特征线进行提取。对提取的焊缝图像不仅需要上述的预处理过程,还需依据摄像机参数,利用几何投影法^[12]对同一帧图像对进行校正。

图 4a、4b 为采集到的焊缝图像,由图可看出激光带边缘参差不齐、亮度相差很大,并且存在反光等噪音信号,阻碍了后续的焊缝激光带特征线的提取,因此需要进行恰当的图像前处理。先对原始图像使用大小为 3×3 像素的中值滤波器模板进行滤波,以平滑图像、去除噪音。将滤波器储存模板(3×3 像素)邻域内的所有像素值依灰度值的大小进行排序,

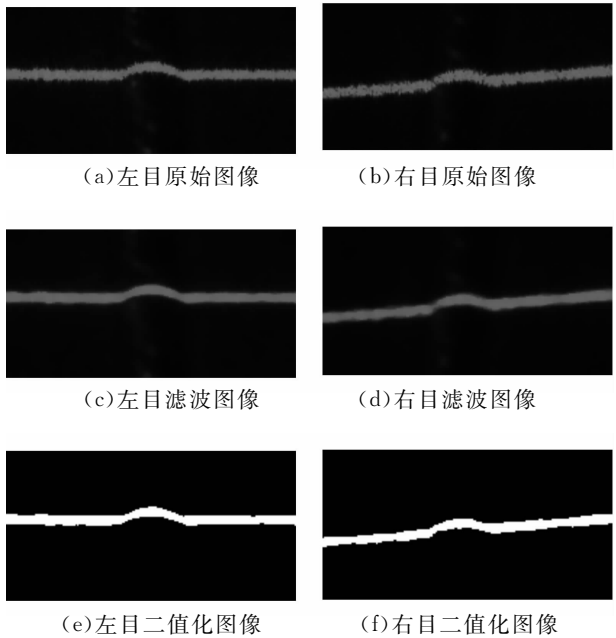


图 4 焊缝结构的光图像

将排在第 5 位的灰度值作为中值。取滤波器储存模板的中值代替其他像素的值,与一般的低通滤波器相比,中值滤波器不仅具有优秀的去噪能力,而且不会使细节变得过于模糊。图 4c、4d 为中值滤波的结果,中值滤波明显平滑了图像,消除了边缘的参差,去掉了反光的影响。

直方图是多种空间域图像处理技术的基础,取同一帧图像对的 ROI,在 Halcon 软件环境下计算 ROI 内的灰度分布直方图,如图 5 所示。ROI 的像素灰度分布主要由 2 部分构成:①由激光带构成,亮度较大,其图像灰度主要分布在 $85\sim 100$ 范围内;②具有亮度相对较小的背景,图像灰度主要分布在 20 以内。无论是左目图像还是右目图像,其激光带

的形状相似,对每一帧图像,ROI 内组成激光带的像素数基本不变。激光带和背景像素的灰度分布规律十分明显,这样的特点反映在灰度分布直方图上,表现在某个低亮度和高亮度区域,并分别出现 2 个波峰(见图 5)。显然,这样的灰度分布规律有利于对图像进行二值化,可从背景中完全分离出激光带。本文对焊缝结构光图像的二值化算法如下。

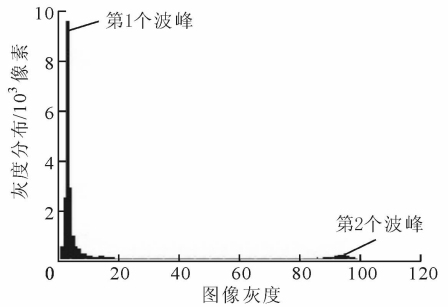


图 5 原始图像 ROI 灰度分布直方图

算法 1 计算 ROI 内图像的灰度分布直方图,选取直方图的极小值作为阈值 T 。由 ROI 灰度分布直方图可知,几乎每对图像都可以直接求得直方图的极小值。

算法 2 若出现多个极小值则对直方图进行高斯平滑处理,扩大高斯平滑模板,直至极小值为 1 个,且选择此极小值为阈值。

算法 3 图像处理的二值化

$$g(x,y)=\begin{cases} 0, & f(x,y)\leq T \\ 255, & f(x,y)>T \end{cases} \tag{9}$$

经二值化处理后的图像如图 4e、4f 所示。

由于本文采用双目立体视觉系统来提取焊缝特征线,因此对每一帧图像对都要利用几何投影法进行图像校正,校正后的图像如图 6 所示。

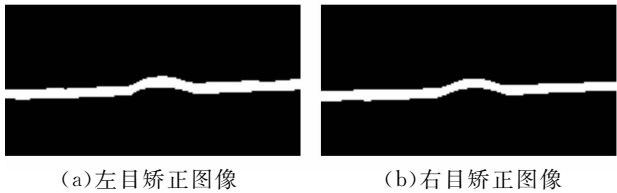


图 6 校正后的焊缝二值图像

3 激光带中心线的提取

经过中值滤波、动态高斯平滑的图像预处理后,已经提取出清晰的激光带,整个激光带内部几乎不存在断点和洞,但对于上下边缘列坐标连续的像素,其行坐标经常会出现相差大于 1 像素的情况。为此,采用 ROI 内激光带第 $i(0\leq i\leq 200)$ 列像素的行

坐标平均值作为该列中心线的行坐标,这样就可以确定激光带中心线上各点的坐标值,即确定了激光带中心线的位置。若激光带内部出现洞或者列相邻的像素行坐标相差很大,按上述方法提取的中心线会存在不连续或偏离的情况,因此需要采取必要的修正措施。对于相邻列行坐标差大于1像素的间断点处的中心线,采用相邻点线性插值的办法加以修正,以得到连续的激光带中心线。图7为按照线性插值方法得到的连续的焊缝激光带中心线。



(a)左目结构光中心线

(b)右目结构光中心线

图7 激光带中心线的提取

采用最大距离法计算出激光带中心线最高点的图像坐标,将该点的图像坐标转换成机器人坐标系坐标,利用激光带最高点的机器人坐标系坐标,就可以控制机器人进行磨抛加工。

4 实验分析

为验证算法的准确性和可靠性,本文进行了焊缝跟踪实验,测定了估算的动态 ROI 中心和实际焊缝最高点的像素坐标,提取了焊缝的中心线,得到的视觉实验系统的参数为:左、右 CCD 相机中心距 $b = 0.132 \text{ m}$,左、右相机焦距 $f = 7.96, 8.24 \text{ mm}$ 。

在机器人的连续2个工作行程内,分别采集了26帧图像对,采样间隔为 0.5 mm 。在机器人的连续20个工作行程内,共采集了1040张图片,计算的左目 ROI 中心像素坐标与实测的焊缝最高点像素坐标(文中取对应点像素距离最大的2个连续行程的图像)之间的对应关系如图8所示。

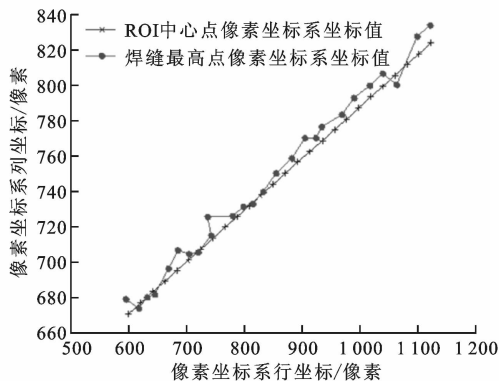


图8 像素坐标系的行坐标与列坐标曲线

由图8可见,第 $i+1$ 个行程焊缝的最高点与 ROI 中心点在像素坐标系的坐标值相差很小,图中曲线在直线上做上下波动,个别点波动较大,这是由焊缝实际最高点在理想拟合直线附近的波动所致。

为了确定激光带转折点是否完全落在 ROI 之内,计算了实际焊缝最高点与 ROI 中心点的像素坐标系的坐标值沿图像行、列方向上的像素距离,根据计算结果可知,实际激光带宽度小于25像素,而 ROI 高度为150像素,最大偏移量为34像素,可见动态 ROI 完全包含了激光带的所有关键点,因此对动态 ROI 进行处理后可提取激光带的中心线。

5 结论

(1)为完成大型结构件焊缝的自动磨抛,本文搭建了融双目视觉和激光测量优点于一体的机器人视觉系统,并利用该视觉系统,对焊后焊缝结构光的特征线进行了快速提取。

(2)根据大型结构件直线焊缝的特点,以及机器人与焊缝特征点之间空间位置的连续性和相关性所提出的动态 ROI 算法,可将待处理图像的面积缩小到原来图像面积的 1.49% ,从而去除了 ROI 以外噪音的影响,极大地提高了算法的速度及稳定性。

(3)根据激光带投影线和加工工件的特点,分析了待处理焊缝的灰度分布直方图,对采集的图像对在动态 ROI 内采用了中值滤波,有效地去除了图像噪音、平滑了激光带边缘。在图像二值化处理过程中,改进了阈值的计算方法,优化了图像的前处理流程。

(4)对动态 ROI 的提取进行了精度实验,在主频 2.0 GB 的计算机上、VC++6.0 环境下,处理每帧图像的时间小于 40 ms 。实验表明:本文提出的动态 ROI 算法可以快速、准确地提取焊缝的中心线,满足焊缝磨抛实时性的要求,从而为实现焊缝磨抛自动化奠定了基础。

参考文献:

- [1] YOO W S, NA S J. Determination of 3-D weld seams in ship blocks using a laser vision sensor [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2003, 22(4): 340-347.
- [2] XU Yanling, YU Huanwei, ZHONG Jiyong, et al. Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision-sensor [EB/OL]. [2012-04-15]. <http://www.springerlink.com/content/q6x511645143416v/fulltext.pdf>.
- [3] PARK K, KIM Y, BYEON J, et al. Development of

- an auto-welding system for CRD nozzle repair welds using a 3D laser vision sensor [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2007, 27(5): 1720-1725.
- [4] 谷春艳, 张立斌, 胡宝坚, 等. 图像处理技术在 CO₂ 焊自动跟踪中的应用 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(4): 70-72.
- GU Chunyan, ZHANG Libin, HU Baojian, et al. Application of image processing automatic tracking of CO₂ arc welding [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2004, 25(4): 70-72.
- [5] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 51-55.
- TANG Zhengzhong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation method based on seed point for large deformation measurement [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11): 51-55.
- [6] 陈炳权, 刘宏立, 孟凡斌. 数字图像处理技术的现状及其发展方向 [J]. *吉首大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(1): 63-70.
- CHEN Bingquan, LIU Hongli, MENG Fanbin. Current situation and development direction of digital Image processing technology [J]. *Journal of Jishou University: Natural Science Edition*, 2009, 30(1): 63-70.
- [7] 唐志文. 浅析数字图像处理技术的研究现状及其发展方向 [J]. *硅谷*, 2010, 10(5): 30-31.
- TANG Zhiwen. Research status and development direction of digital image processing [J]. *Silicon Valley*, 2010, 10(5): 30-31.
- [8] CHEN Shanben, CHEN Xizhang. Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2005, 43(9): 77-97.
- [9] 孔萌, 陈善本, 林涛. 基于复合边缘检测算子的焊缝边缘提取 [J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(5): 693-696.
- KONG Meng, CHEN Shanben, LIN Tao. Weld seam edge detection based on composite edge detectors [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(5): 693-696.
- [10] 盛仲曦, 马宏波, 卫善春, 等. 基于视觉传感的焊缝跟踪技术 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(S1): 130-133.
- SHENG Zhongxi, MA Hongbo, WEI Shanchun, et al. Automatic seam tracking system based on vision sensor [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(S1): 130-133.
- [11] 李原, 徐德, 沈扬, 等. 一种焊缝结构光图像处理与特征提取方法 [J]. *焊接学报*, 2006, 27(9): 25-30.
- LI Yuan, XU De, SHEN Yang, et al. An image processing and features extraction method for structured light image of welding seam [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(9): 25-30.
- [12] 艾海舟, 苏延超. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 413-414.

(编辑 管咏梅)

(上接第 106 页)

- [5] DAVIAUD F, HEGSETH J, BERGE P. Subcritical transition to turbulence in plane Couette flow [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(17): 2511-2514.
- [6] PRIGENT A, GREGOIRE G, CHATE H, et al. Large-scale finite-wavelength modulation within turbulent shear flows [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(1): 014501.
- [7] IIDA O, NAGANO Y. The relaminarization mechanisms of turbulent channel flow at low Reynolds numbers flow [J]. *Turbulence and Combustion*, 1998, 60(2): 193-213.
- [8] TSUKAHARA T, IWAMOTO K, KAWAMURA H, et al. On the large-scale structure of turbulent heat transfer in a plane Couette flow [J]. *Thermal Science and Engineering*, 2007, 15(3): 151-162.
- [9] TSUKAHARA T, KAWAMURA H. Turbulent heat transfer in a channel flow at transitional Reynolds numbers [C/CD]//Proc of the 1st Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2007: 055.
- [10] HASHIMOTO S, HASOBE A, TSUKAHARA T, et al. An experimental study on turbulent-stripe structure in transitional channel flow [C]//Proc of the Fifth Int Symp on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 2009: 2370-2379.

(编辑 荆树蓉)