

基于激光视觉的角焊缝图像特征点提取

刘子腾¹, 白瑞林¹, 王秀平^{1,2}

(1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 无锡 214122; 2. 无锡科技职业学院, 无锡 214028)

摘要: 提出一种借助线激光从图像中提取角焊缝特征点的方法, 克服了线激光在角焊缝表面的反光对提取光条中心线的影响, 有效地识别出了角焊缝特征点. 首先, 根据局部对比度区分实际光条与反光条纹, 用阈值分割结合图像形态学方法分割出实际光条, 并确定 ROI 区域; 其次, 根据光条截面的灰度分布提取光条中心点; 最后, 用迭代最小二乘法拟合分段光条中心线方程并确定角焊缝特征点. 结果表明, 该方法能够快速准确地提取表面光亮角焊缝的亚像素图像特征点, 在主频 3.4 GHz 的 PC 机上共用时 0.35 s, 能够满足焊接速度为 0~25 mm/s 的普通焊接设备的实时性要求.

关键词: 线激光; 反光条纹; 光条中心点; 分段直线拟合

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)02-0089-05

0 序 言

基于机器视觉的焊缝定位技术现阶段正在快速发展并且在某些工业场得到了应用, 其中由相机和激光结构光组成的视觉传感器由于结构简单、测量精度高等优点得到了国内外学者的广泛研究^[1-3]. 视觉传感器图像处理的关键是提取图像中受焊缝形状调制形成的光条的中心点, 并拟合光条方程以确定焊缝特征点. 文献[4]采用罗伯特近似梯度算子检测光条边缘以得到近似中心线, 再用重心法提取准确的中心. 该方法能快速提取中心点, 但是方向性差且抗干扰能力不强. 文献[5]用 Hessian 矩阵计算光条方向, 在截面上取灰度的一阶导数过零点作为中心. 该方法的精度很高但是对于不同亮度和宽度的光条鲁棒性较差. 同时, 若焊缝表面反射系数较高, 则激光条会发生强烈的反射, 干扰光条中心线的正确提取. 文中针对这一情况提出一种在图像中去除反光的方法, 并研究了光条中心点提取方法和光条方程拟合方法. 利用该方法能够快速准确地提取表面光亮角焊缝的亚像素图像特征点.

1 分割实际光条

角焊缝表面的反光特性介于理想漫反射与镜面反射之间, 因此打在角焊缝表面的激光条会反射至

相邻表面, 如图 1 所示. 并且环境光以及焊接过程中的飞溅也会对采集的图像造成干扰. 在相机镜头前加装滤光片可以过滤环境光和大部分飞溅, 但是对于反射光没有作用, 如图 2a 所示. 同时为了加快算法速度, 需要分割实际光条所在的图像部分作为 ROI 区域 (region of interest) 以减少运算量. 因此在提取光条中心点之前必须去除反射光条并且分割出实际光条在图像中所处的区域.

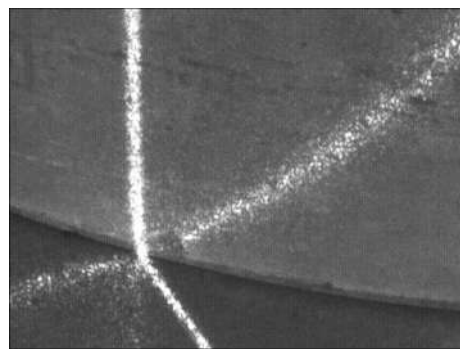


图 1 角焊缝线激光检测图像

Fig. 1 Picture of fillet weld inspected by laser

1.1 区分实际光条和反射光条

反射光条的形状和灰度与实际光条相似, 不能直接通过设置灰度阈值去除. 文献[6]使用两个偏振状态互相垂直的偏振片可以在很大程度上消除镜面反射光, 但是需要计算相机平面与激光平面的夹角等几何结构参数, 而且在某些场合下不能满足夹角要求因此使用范围受限. 文献[7]通过去除小面

积的连通域消除反射光条,但是在某些情况下实际光条中会出现散斑,因此部分实际光条会被去除。

比较实际光条和反射光条的灰度分布可以发现实际光条的灰度变化比较连续,而反射光条的灰度变化比较剧烈。图2b为截取图2a中某行的灰度分布,可以看出实际光条的灰度变化是连续的且范围较窄,而反射光条的宽度较大且灰度起伏比较明显。刻画这一纹理特征的量是灰度对比度,可以用局部标准差来表示。

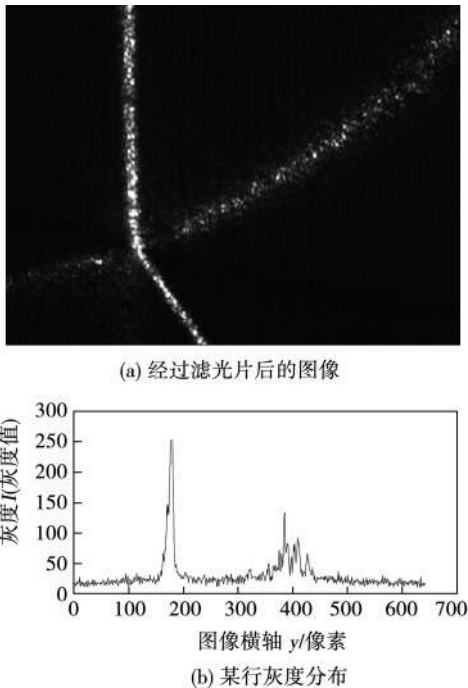


图2 光条截面灰度分布

Fig. 2 Light intensity distribution of cross-section

局部标准差 σ_{local} 的计算公式为

$$\sigma_{\text{local}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I(x_i) - \overline{I(x)})^2} \quad (1)$$

式中: $I(x_i)$ 为邻域窗口内某个像素点的灰度值; $\overline{I(x)}$ 为邻域窗口内所有像素点灰度值的平均值; n 为邻域内包含的像素点数目。然而,由于角焊缝表面各处的反射率可能不同,因此图像中各局部的灰度范围有差别,也就是说某局部区域内灰度分布的形状和其它区域一致,但是会被整体缩放几倍。为了消除不同灰度范围带来的影响引入变异系数 $C \cdot V$ (coefficient of variation), 计算公式为

$$C \cdot V = \frac{\sigma_{\text{local}}}{I(x)} \quad (2)$$

选择边长为光条宽度的矩形窗口根据式(2)计算原始图像各点的变异系数,其中属于实际光条的点变异系数较大而属于反射光条和背景的点变异系数较

小,因此实现了区分实际光条与反射光条的目的。

1.2 ROI 区域分割

用大津法自动确定变异系数的阈值,将原始图像二值化。但是获得的二值图像模板中依然可能包含小部分反射光条并且实际光条的中心和边缘会出现残缺,因此还需要对此二值图像采用图像形态学方法去除干扰并且修复实际光条。具体的步骤如下。

(1) 对二值图像模板执行闭运算以填补实际光条的中心和边缘。

(2) 由重构做开运算以去除残留的干扰同时保留实际光条。

(3) 用 3×3 模板适当膨胀以扩大二值图像模板在实际光条附近包含的区域。

将经过图像形态学处理后的二值图像模板与原始图像相乘就去除了反射条纹如图3a所示,取光条区域中横纵坐标最大最小的四个顶点围成的最小外接矩形作为图像 ROI 区域如图3b所示。

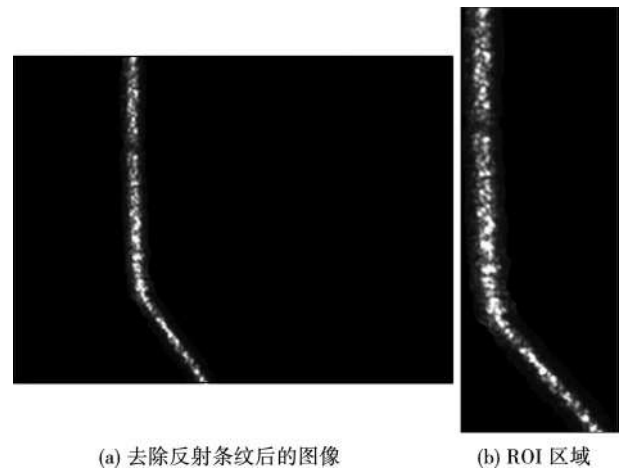


图3 分割实际光条

Fig. 3 Real light stripe obtained by segmentation

2 光条中心点提取

2.1 光条灰度模型

由激光器手册得知线激光截面的光强呈高斯分布,因此图像中光条截面的灰度模型为

$$f(x, \sigma_l) = A e^{-\frac{x^2}{2\sigma_l^2}} \quad (3)$$

式中: A 为中心点的灰度; σ_l 为标准差。中心点 $f(0, \sigma_l)$ 是光条截面上的灰度极大值点同时也是一阶导数过零点和二阶导数极小值点。实际中比较方便的做法是将二阶导数绝对值较大的凸点作为光条中心点。

将图像灰度曲面 $z(x, y)$ 在某点 (x_i, y_i) 的二维邻域内展开成二阶泰勒多项式如式(4)所示,其中 $H(x, y)$ 为二阶 Hessian 矩阵。

$$z(x_i + \delta x, y_i + \delta y) = z(x_i, y_i) + \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right] z(x_i, y_i) [\delta x, \delta y]^T + \frac{1}{2} [\delta x, \delta y] H(x, y) [\delta x, \delta y]^T \quad (4)$$

Hessian 矩阵的表达式如式(5)所示,其中 z_{xx}, z_{yy}, z_{xy} 分别为 $z(x, y)$ 沿 x, y 方向的二阶偏导数以及混合偏导数. Hessian 矩阵绝对值最大的特征值就是灰度曲面在该点沿所有方向中最大的二阶方向导数,其所对应的特征向量即指向此方向,也就是光条截面方向.

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} z_{xx} & z_{xy} \\ z_{xy} & z_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设 Hessian 矩阵绝对值最大的特征值对应的单位特征向量为 $(\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y)$, 以 t 为参量, 将 $t(\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y)$ 带入式(4)得 $z(x, y)$ 在点 (x_i, y_i) 处沿光条截面方向关于 t 的一元泰勒展开式, 即

$$z(x_i + t\mathbf{n}_x, y_i + t\mathbf{n}_y) = z(x_i, y_i) + t\mathbf{n}_x z_x(x_i, y_i) + t\mathbf{n}_y z_y(x_i, y_i) + \frac{1}{2} [t^2 \mathbf{n}_x^2 z_{xx}(x_i, y_i) + 2t^2 \mathbf{n}_x \mathbf{n}_y z_{xy}(x_i, y_i) + t^2 \mathbf{n}_y^2 z_{yy}(x_i, y_i)] \quad (6)$$

t 的不同取值代表点 (x_i, y_i) 所在光条截面上的不同位置. 将式(6)对 t 求导并令导数为 0 可求得光条截面上灰度分布曲线的一阶导数过零点 $(x_i + t_i \mathbf{n}_x, y_i + t_i \mathbf{n}_y)$, 其中,

$$t_i = - \frac{z_x \mathbf{n}_x + z_y \mathbf{n}_y}{z_{xx} \mathbf{n}_x^2 + 2z_{xy} \mathbf{n}_x \mathbf{n}_y + z_{yy} \mathbf{n}_y^2} \quad (7)$$

将式(6)对 t 求二阶导可求得灰度曲面 $z(x, y)$ 在点 (x_i, y_i) 所在光条截面方向的二阶导数为

$$z''(x_i, y_i) = \mathbf{n}_x^2 z_{xx} + 2\mathbf{n}_x \mathbf{n}_y z_{xy} + \mathbf{n}_y^2 z_{yy} \quad (8)$$

2.2 图像微分

离散域中通常用差分来替代连续域中的微分, 但是这通常会带来较大的误差. 而且为了消除噪声或者毛刺的影响, 实际图像在微分前必须先用平滑滤波器滤波(卷积), 其中高斯滤波器是最常用的平滑滤波器. 由于卷积具有微分可分离性, 因此 Steger^[5] 提出用二维高斯函数 $g(x, y)$ 的各阶导数作为模板卷积图像得到各阶微分. 各核函数如下:

$$\left. \begin{aligned} g(x, y) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \frac{\partial g}{\partial x} &= \frac{-x}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \frac{\partial g}{\partial y} &= \frac{-y}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial^2 x} &= \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial^2 y} &= \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{y^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} &= \frac{-xy}{2\pi\sigma^6} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.3 判断光条中心点

如前所述, 光条中心点是一阶导数为零且二阶导数绝对值较大的凸点. 若 (x_i, y_i) 为一阶导数过零点则 $(t_i \mathbf{n}_x, t_i \mathbf{n}_y)$ 应该在区间 $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$ 内, 根据这一条件可以判断点 (x_i, y_i) 在光条截面方向的一阶导数是否为 0.

光条截面方向上的二阶导数由式(8)得到. 事实上, 其解析式可以通过求解光条截面的灰度分布 $f(x, \sigma_l)$ 与一维二阶高斯函数 $g''(x, \sigma)$ 的卷积得到, 即

$$r'' = g''(x, \sigma) * f(x, \sigma_l) = A\sigma_l \frac{x^2 - (\sigma_l^2 + \sigma^2)}{(\sigma_l^2 + \sigma^2)^{\frac{5}{2}}} e^{-\frac{x^2}{2(\sigma_l^2 + \sigma^2)}} \quad (10)$$

r'' 为二阶导数的解析式, 中心点处的二阶导数为

$$r''|_{x=0} = -A\sigma_l (\sigma_l^2 + \sigma^2)^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式(11)是设定用于判断是否是凸点的二阶导数范围的依据. 但是一方面比例因子 A, σ_l 的值是未知的, 另一方面由于反射率不同, A 的值在不同光条截面相差很大. 为了消除 A , 将 r'' 除以 r 得 λ , 即

$$\lambda = r''/r = \frac{x^2 - (\sigma_l^2 + \sigma^2)}{(\sigma_l^2 + \sigma^2)^2} \quad (12)$$

其中 $r = g(x, \sigma) * f(x, \sigma_l) = \frac{A\sigma_l}{(\sigma_l^2 + \sigma^2)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{x^2}{2(\sigma_l^2 + \sigma^2)}}$.

取所有小于 0 的 λ 的中位值 λ_{mid} 作为上限, $2\lambda_{\text{mid}}$ 作为下限, λ 在此范围内的点就是凸点.

由式(11)可以看出 $|r''|$ 随核函数尺度因子 σ 的增大而减小, 因此为了使中心点处的特征更加明显应选择较小的 σ , 但是 σ 过小起不到平滑噪声的作用. 综合来说, σ 在 3~5 之间能平衡两者.

综上, 提取光条中心点的步骤如下.

(1) 将式(9)所示各核函数采样离散化后作为模板分别与图像 ROI 区域卷积, 模板大小通常为 $(6\sigma + 1) \times (6\sigma + 1)$, 得到 ROI 区域中各点灰度在 x, y 方向上的各阶偏导数与混合偏导数.

(2) 由 Hessian 矩阵计算各点所在光条截面的方向 $(\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y)$, 并由式(7)计算 $(t_i \mathbf{n}_x, t_i \mathbf{n}_y)$ 是否在 $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$ 区间内, 从而判断光条截面方向上的灰度曲线在该点处的一阶导数是否为 0, 将所有为 0 的点组成集合 N .

(3) 对 N 中的点由式(8)得到各点的二阶导数, 再由式(12)计算对应的 λ , 此时 r 为 ROI 图像经高斯平滑后的灰度. 取 λ 在区间 $[2\lambda_{\text{mid}}, \lambda_{\text{mid}}]$ 内的点作为光条中心点, 亚像素中心点为 $(x_i + t_i \mathbf{n}_x, y_i + t_i \mathbf{n}_y)$.

3 角焊缝特征点提取

3.1 直线拟合

拟合直线方程最基本的方法是最小二乘法, 准则函数定义为参与拟合的点与拟合直线距离误差的平方和, 极小化准则函数就得到了最佳拟合直线的参数. 直线参数由式(13)计算得到. 其中 x_i, y_i 为参与拟合点的坐标, n 为拟合点数目, k, b 为拟合直线斜截式方程参数.

$$\begin{bmatrix} k \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

为了避免误提取的中心点等干扰点对直线方程造成影响, 要对参与拟合的点列多次使用最小二乘法拟合直线方程. 定义直线的线性度 L 为^[9]

$$L = 1 - \frac{M}{R^2} \quad (14)$$

式中: M 为拟合点与拟合直线偏差的均方值; R 为容错范围, 即偏差在 R 以内的点属于该拟合直线. L 越接近于 1 则拟合越精确. 每得到一条拟合直线之后去除拟合点中偏差大于平均值的点再次拟合, 直到 L 大于 0.9 为止.

3.2 拟合分段光条中心线方程

拟合分段直线的关键是确定分界点, 采用迭代的方法拟合分段光条方程. 步骤如下.

(1) 将所有光条中心点按 x 坐标排序, 构成点列 P .

(2) 取点列 P 的中位点作为分界点将 P 分成两段, 分别拟合直线方程.

(3) 计算两条直线的交点, 在 P 中寻找与其距离最近的点作为新的分界点将 P 分成两段, 再次分别拟合直线方程.

(4) 重复步骤(3)直到分界点位置不再改变为止, 得到两段光条中心线方程. 最终两段光条中心线的交点就是角焊缝特征点.

4 试验结果

为了验证角焊缝特征点提取方法的有效性, 采集了多幅角焊缝线激光检测图片实施以上算法提取特征点. 试验中用到的设备有大恒 GCO-3001M 结构激光器、Imaging Source 分辨率为 480×640 的 CMOS 工业相机、kowa 8 mm 镜头、630 nm 滤光片等. 角焊缝的筋板为不锈钢圆柱, 底板为铁板. 所有

算法均在 Matlab2011b 平台上实现.

在图 3b 中提取光条中心点如图 4a 所示. 拟合分段光条中心线并获得角焊缝特征点如图 4b 所示. 提取的角焊缝特征点在原始图像中的坐标为 (344, 14, 180, 23).

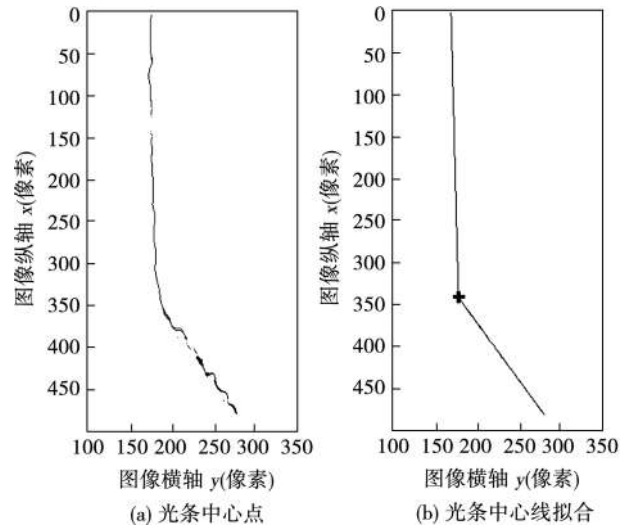


图 4 试验结果

Fig. 4 Experimental result

为了验证算法的稳定性, 从不同角度拍摄了角焊缝若干位置的线激光检测图片, 提取光条中心线以及特征点如图 5 所示.

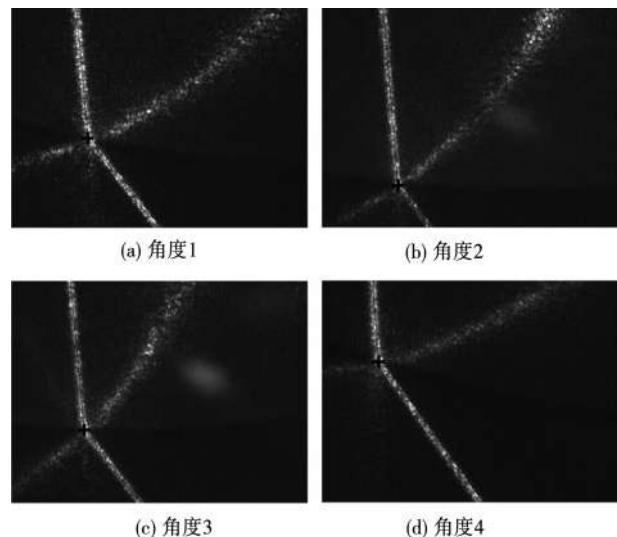


图 5 算法稳定性验证

Fig. 5 Stability verification of algorithm

在主频为 3.4 GHz, 内存为 2 GB 的 PC 机上运行上述算法, 从采集图片到提取角焊缝特征点平均共用时 0.35 s, 能够满足焊接速度为 0 ~ 25 mm/s 的普通焊接设备的实时性要求.

5 结 论

(1) 通过计算图像局部标准差和平均值作为纹理特征能够区分出实际光条和反射光条,经过特征阈值分割去除反射光条。

(2) 根据光条截面灰度呈高斯分布的特点提取中心点。由 Hessian 矩阵确定光条截面的方向,在此方向上搜索灰度曲线一阶导数为 0 且二阶导数在某个区间内的点作为中心点。该方法能够自动确定筛选中心点所用的二阶导数参数区间,因此对于不同宽度和亮度的光条均适用。

(3) 多次迭代拟合分段直线直到分界点稳定为止。相比 Hough 变换等直线拟合方法,该方法能够快速拟合分段直线方程。

参考文献:

- [1] Wu B, Xue T, Zhang T, *et al.* A novel method for round steel measurement with a multi-line structured light vision sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2): 025204 – 025208.
- [2] Li Y, Li Y F, Wang Q L, *et al.* Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1841 – 1849.
- [3] 陈海永, 孙鹤旭, 徐 德. 一类窄焊缝的结构光图像特征提取方法[J]. *焊接学报*, 2012, 33(1): 61 – 64.
Chen Haiyong, Sun Hexu, Xu De. An image feature extraction method for a certain kind of narrow gap weld seam[J]. *Transac-*

tions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 61 – 64.

- [4] 李中伟, 王从军, 史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(1): 64 – 68.
Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng. An algorithm for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1): 64 – 68.
- [5] Steger C. Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, 117(2): 97 – 112.
- [6] 赵小松, 张国雄, 张宏伟. 测量强反射表面的测头研究[J]. *天津大学学报*, 2004, 37(3): 274 – 277.
Zhao Xiaosong, Zhang Guoxiong, Zhang Hongwei. Probe for measuring high reflective surface[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(3): 274 – 277.
- [7] 赵博华, 王伯雄, 张 金, 等. 粗糙金属表面光条中心提取方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2138 – 2144.
Zhao Bohua, Wang Boxiong, Zhang Jin, *et al.* Extraction of laser strip center on rough metal surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2138 – 2144.
- [8] 丁 锋. 系统辨识新论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] 秦 涛, 张 轲, 邓景煜, 等. 基于改进最小二乘法的焊缝特征直线提取方法[J]. *焊接学报*, 2012, 33(2): 33 – 36.
Qin Tao, Zhang Ke, Deng Jingyu, *et al.* Algorithm of extracting feature lines in welding seam image based on improved least-square method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(2): 33 – 36.

作者简介: 刘子腾,男,1989 年出生,硕士研究生。研究方向为嵌入式机器视觉理论与应用。发表论文 1 篇。Email: lzt.89@163.com

通讯作者: 白瑞林,男,教授,博士研究生导师。Email: bairuilin@hotmail.com

[上接第 88 页]

- Lu Jinbin, Meng Pu, Fan Ping, *et al.* Nucleation and growth of Cr_7C_3 of brazing diamond with Ni-Cr alloy in protective atmosphere furnace[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(9): 65 – 68.
- [3] 肖 冰, 徐鸿钧, 武志斌, 等. Ni-Cr 合金真空单层钎焊金刚石砂轮[J]. *焊接学报*, 2001, 22(2): 23 – 26.
Xiao Bing, Xu Hongjun, Wu Zhibin, *et al.* Furnace brazing of diamond grinding wheel with Ni-Cr alloy under vacuum atmosphere [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(2): 23 – 26.
- [4] Chattopadhyay A K, Chollet L, Hintermann H E. Experimental investigation on induction brazing of diamond with Ni-Cr hardfacing alloy under argon atmosphere[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(18): 5093 – 5100.
- [5] 丁兰英, 傅玉灿, 陈 燕, 等. Ag-Cu-Ti/TiC 复合钎料钎焊细粒度金刚石的研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(8): 1509 – 1514.
Ding Lanying, Fu Yucan, Chen Yan, *et al.* Brazing of fine diamond grains using composite fillers of Ag-Cu-Ti alloy and TiC par-

ticles[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(8): 1509 – 1514.

- [6] 丁文锋, 徐九华, 傅玉灿, 等. 单层钎焊立方氮化硼砂轮工作面磨粒包埋深度的确定[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(3): 441 – 445.
Ding Wenfeng, Xu Jiuhua, Fu Yucan, *et al.* Determination of embedding depth of abrasive grains on working surface of single-layer brazed CBN grinding wheel[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(3): 441 – 445.
- [7] 王大勇, 冯吉才. 杨氏方程的能量求解法及润湿角计算模型[J]. *焊接学报*, 2002, 23(6): 59 – 61.
Wang Dayong, Feng Jicai. Obtaining of young equation by principle of energy and establishment of wetting angle model[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(6): 59 – 61.

作者简介: 王 波,男,1986 年出生,博士研究生。主要从事钎焊工艺、超硬磨料工具制备研究。发表论文 5 篇。Email: banyuduolu@sina.com

通讯作者: 肖 冰,男,教授,博士生导师。Email: xb Xiao@263.net