

# 一种基于线结构光的焊缝三维重建方法

郑鹭斌 王晓栋 严菲

厦门理工学院计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024

**摘要** 介绍了一种基于结构光和双目视觉的焊缝三维重建方法。该方法利用轮廓点曲率提取激光条纹的轮廓关键点,再由所提取的关键点计算轮廓横截面法向量。并根据激光条纹服从正态分布的特点,借助灰度重心法提取条纹中心线。将焊缝在双目摄像机中的图像坐标点转换为世界坐标点,从而完成焊缝三维空间信息的重建。实验结果证明本文方法快速、准确,可以满足自动焊接机器人系统的应用要求。

**关键词** 机器视觉;线结构光;偏态分布;灰度重心;三维重建

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.041005

## 3D Reconstruction Method Based on Linear-Structured Light Stripe for Welding Seam

Zheng Lubin Wang Xiaodong Yan Fei

School of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

**Abstract** A 3D reconstruction method based on linear-structured light stripe and binocular vision is proposed. The key points are extracted by the contour curvature, and are used to extract the normal vector of the contour. With the characteristics of the skewness of the distribution, the stripe center is extracted based on the barycenter method. The 3D reconstruction process is finished while the image coordinate of the welding seam are transformed to the world coordinate. The experimental results show that this method is quick and accurate, and is suitable for the requirements of the structure light welding system.

**Key words** machine vision; linear-structured light; skewed distribution; barycenter; 3D reconstruction

**OCIS codes** 100.3010; 100.6890

### 1 引言

随着电子技术、计算机技术、自动化技术的发展,自动焊接机器人由于其高密闭性、高可靠性的特点,被广泛应用于客车车体、轮船等大型器件的成型连接中<sup>[1]</sup>。然而,现有的自动焊接机器人往往需要操作人员手工配置焊接路径,并且在焊接过程中无法实时监控焊接质量,从而导致焊接效率低、过焊、漏焊等问题。为此,许多研究人员提出利用传感技术辅助焊接机器人进行自动化作业,其中,基于激光传感的机器视觉技术应用最为广泛<sup>[2]</sup>。根据所用摄像机数目的不同,基于激光传感的机器视觉技术可分为单目视觉法、双目视觉法和多目视觉法:单目视觉法主要利用单视点的单幅或多幅图像的二维特征提取深度信息,该方法所需设备简单、易于安装,但其存在重建精度差,重建时间长等问题;双目视觉法利用两个摄像机获取物体在不同视角下的图像,并配合图像特征提取和匹配等算法提取深度信息,可以获取较高的精确度;多目视觉法则是在双目视觉法的基础上再增加一个或多个摄像机以提供额外约束,从而获得更高的精度,但是由于摄像机数量的增加,使得该系统的设备结构复杂度、控制难度、成本也大幅提高。因此,双目视觉法的应用最为广泛。近年来,针对基于双目视觉法的三维重建方法已有很多研究成果<sup>[1-3]</sup>,但大多数方法很难同时保证实时性和准确性。本文提出的方法利用轮廓线关键点以提高算法的处理速度,利用能量正态分布特点优化条纹中心以提高激光条纹中心的提取精度,能够满足自动焊接系统对实时性和准确性的需求。

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01; 网络出版日期: 2014-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61103246,61273290)、福建省科技重大专项重点项目(2012H6025)

作者简介: 郑鹭斌(1975—),男,工程师,主要从事智能控制、图像处理等方面的研究。

E-mail: buffaloiro999@gmail.com

## 2 双目立体视觉系统安装示意图

图1为焊接机器人双目立体视觉系统安装示意图,该系统由一个线结构光发射器、两个 CCD 工业摄像头、图像采集卡、及计算机组成,其中左、右摄像头镜头前安装有短波滤光片,用于过滤焊接时产生的弧光。

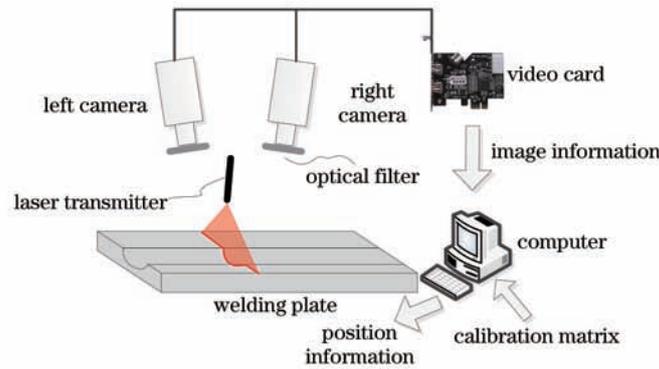


图1 双目立体视觉系统安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of binocular stereo vision system

线结构光发射器以一定的角度照射在焊接板焊缝表面上,左右摄像头采集到的焊缝结构光条纹图像通过图像采集卡传输到计算机,图像处理软件系统提取左右图像中的焊缝结构光条纹中心,结合左右摄像机的标定矩阵计算出焊缝的三维空间位置信息,并最终交由焊接机器人完成相关焊接任务。因此,焊缝结构光条纹中心提取的准确与否是机器人能否正确完成焊接任务的关键。

## 3 线结构光条纹中心提取

图2为算法流程图,重点描述如何进行结构光条纹中心提取,因此算法假设已经正确提取出激光光条的轮廓,提取轮廓的方法有基于颜色空间法、梯度法等<sup>[4]</sup>,本文在此不再赘述。

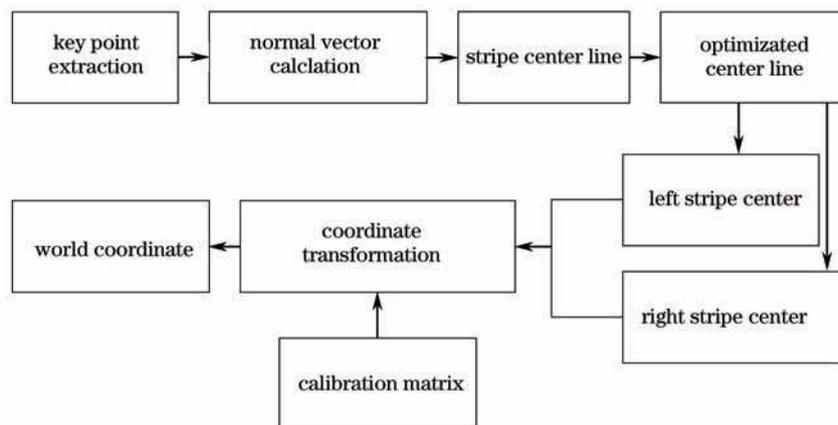


图2 算法示意图

Fig.2 Algorithm schematic

### 3.1 轮廓关键点提取及法向量计算

为了提高激光条纹中心线提取的速度,需要精简轮廓线上的点,文献[5]采用轮廓多边形的方法对轮廓进行分段处理,可以快速完成关键点的提取,然而该方法无法解决轮廓局部曲率较大的问题。为了解决这一问题,本文提出基于轮廓点曲率分段的关键点提取方法,提取流程如下:

1) 轮廓点曲率的定义参考文献[6],具体定义方法如下:

设逆时针方向为正方向,轮廓上的任意一点  $P$  左侧有  $n$  个点分别为  $P_0, P_1, \dots, P_n$ ,则该点的左侧方向矢量  $P_l$  定义为

$$P_l = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{P_i - P}{\|P_i - P\|}. \quad (1)$$

同样假设点  $P$  右侧  $n$  个点,  $Q_0, Q_1, \dots, Q_n$ , 则该点右侧方向矢量  $P_R$  定义为

$$P_R = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{Q_i - Q}{\|Q_i - Q\|}, \quad (2)$$

则点  $P$  的曲率为

$$r(P) = \left\| \frac{P_L - P_R}{2} \right\|. \quad (3)$$

## 2) 轮廓分段

① 选取合适的  $n$  值, 一般取  $n=30$ , 按 (3) 式计算每个点的变化率  $r(P)$ , 将所有的点标记为 0。

② 计算所有标记为 0 轮廓点的平均变化率  $\bar{r}(P)$ , 按照顺时针方向判断所有未标记为 0 的轮廓点, 若被判断轮廓点变化率不大于  $\bar{r}(P)$ , 则将其标记为 1。

③ 扫描所有被标记为 1 的轮廓点, 按照其连续性对其分段, 即如果两个相邻轮廓点均标记为 1, 则认为它们属于同一分段。按顺时针方向取每一个分段上的起始点  $P_s$  为分段关键点, 将  $P_s$  加入关键点集合  $U = U \cup P_s$ , 并标记该分段上的点为已分类。

④ 若所有的轮廓点均已被标记为 1 且已分类, 则终止分段, 轮廓关键点集合  $U$  即为所得。否则跳转至 ②。

## 3) 轮廓关键点法向量计算

文献[7]利用 Bazen 方法能够准确地计算出光条轮廓点的法向量, 但其对轮廓的每一个数据点均进行法向量的计算, 增加了计算的复杂度。为此, 在轮廓分段的基础上, 本文以相邻两个关键点的分段为单位进行法向量的提取, 同一段段上的每一个数据点, 均采用相同的法向量。设顺时针方向为正方向, 具体计算方法为

$$v_x(c_x, c_y) = \sum_{i=c_x-\frac{w}{2}}^{i=c_x+\frac{w}{2}} \sum_{j=c_y-\frac{w}{2}}^{j=c_y+\frac{w}{2}} [G_x^2(p_{ij}) - G_y^2(p_{ij})], \quad (4)$$

$$v_y(c_x, c_y) = \sum_{i=c_x-\frac{w}{2}}^{i=c_x+\frac{w}{2}} \sum_{j=c_y-\frac{w}{2}}^{j=c_y+\frac{w}{2}} 2[G_x^2(p_{ij})G_y^2(p_{ij})], \quad (5)$$

$$\theta(c_x, c_y) = \frac{1}{2} \arctan \frac{v_x(c_x, c_y)}{v_y(c_x, c_y)}, \quad (6)$$

式中  $c_x$  和  $c_y$  分别代表轮廓两个关键点之间分段的中心  $x$  和  $y$  的方向坐标,  $w$  代表以  $c_x$  和  $c_y$  为中心的  $w \times w$  子块,  $p_{ij}$  代表轮廓分段区间上的点, 且  $G_x^2(p_{ij}) \neq 0, G_y^2(p_{ij}) \neq 0$ 。如果  $G_x^2(p_{ij})$  或  $G_y^2(p_{ij})$  为 0, 则  $\theta(c_x, c_y)$  为 0, 则分段法方向为

$$T(c_x, c_y) = \theta(c_x, c_y) + \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

## 4) 轮廓横截面分块及其法向量计算

一般地, 轮廓的边缘并非总是平行的, 这给准确计算轮廓横截面的法向量带来难度, 因此需要将轮廓横截面按照其平行特性进行分块, 使得轮廓分块内的双边缘尽量保持平行, 从而提高轮廓横截面法向量计算精度。轮廓横截面分块方法为

① 选取轮廓关键点集合  $U$  中距离最远的两个关键点  $q_s$  和  $q_e$  分别作为起始扫描点和结束扫描点, 设置起始扫描点集  $U_s = \{q_s\}$ , 横截面分块集合  $U_{cs} = \{\}$ 。

② 以起始扫描点集的中心点为圆心, 轮廓关键点集合  $U$  中距离圆心最近的关键点为半径作圆, 则该圆与轮廓的交集  $U_c$ 、起始扫描点集  $U_s$  所组成的区域为所求分块, 更新横截面分块集合  $U_{cs} = \{U_s, U_c\} \cup U_{cs}$ , 更新起始扫描点集  $U_s = U_c$ 。若  $q_e \in U_s$  则返回 ②, 否则跳转至 ③。

③ 横截面分块集合  $U_{cs}$  即为所求。

以图 3 为例, 图中实心“十”字为圆与轮廓的交点的中心点, 深色实心圆点的轮廓关键点与浅色实心圆点的轮廓分段点共同组成了轮廓横截面分块的边界点。

在计算出横截面分块集合  $U_{cs}$  的基础上,按照3)中分段法向量计算方法,计算  $U_{cs}$  中每个横截面分块中边缘分段的法向量,并以所有法向量的均值作为该横截面的法向量。以图3右边第一个横截面分块为例,其对应于图4中的阴影部分,则该法向量  $n_a$  定义为

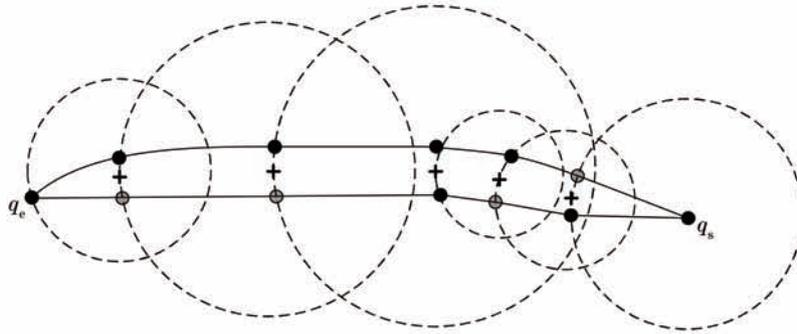


图3 轮廓横截面分段选择示意图

Fig.3 Schematic of cross section selection

$$n_a = \frac{n_t + n_s}{2}. \quad (8)$$

式中  $n_s$  和  $n_t$  分别为阴影部分横截面上下分段的法向量。

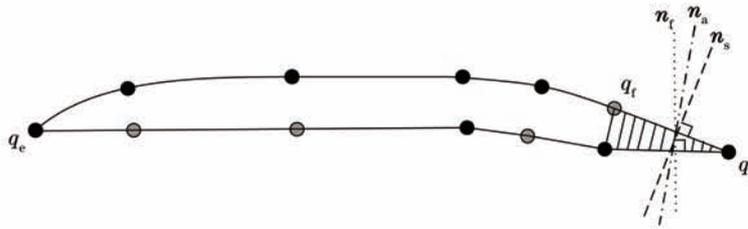


图4 轮廓横截面法向量计算示意图

Fig.4 Calculation schematic of normal vector of cross section

### 3.2 条纹中心提取

一般地,光刀在横截面法向量方向上的能量强度是服从正态分布的。按照3.1节中计算出的横截面法向量,可以利用灰度重心法<sup>[8-9]</sup>提取激光条纹初始中心,条纹中心计算方法如下:

$$x_{cen} = \frac{\sum_{p_i \in l_z, f(p_i) > g_{th}} x_{p_i} \times f(p_i)}{\sum_{p_i \in l_z, f(p_i) > g_{th}} f(p_i)},$$

$$y_{cen} = \frac{\sum_{p_i \in l_z, f(p_i) > g_{th}} y_{p_i} \times f(p_i)}{\sum_{p_i \in l_z, f(p_i) > g_{th}} f(p_i)}. \quad (9)$$

式中  $g_{th}$  为激光条纹轮廓提取的灰度阈值,  $x_{p_i}$  和  $y_{p_i}$  分别为  $p_i$  对应像素点的  $x$  和  $y$  坐标,  $f(p_i)$  为激光条纹原始图像中扫描线  $l_z$  上  $p_i$  像素点所对应的灰度值。

## 4 焊缝三维空间信息计算

传统三维重建方法一般需要提取双目图像的特征点和匹配,这项工作是非常耗时的,无法满足自动焊接机器人对实时性的需求。为此,在完成左右摄像机激光条纹中心线的提取之后,借助文献[10]中的直线-直线匹配方法,快速完成左右摄像机焊缝中心线的匹配。并根据左右摄像机的标定矩阵计算出匹配点的三维空间信息。

设左右摄像头焊缝匹配点的图像坐标分别为  $p(u, v)$  和  $p'(u', v')$ , 其焊缝匹配点的世界坐标为

$P(X,Y,Z)$ ,经标定所得左右两个摄像机的投影矩阵分别为  $M$  和  $M'$ ,  $M$  和  $M'$  为  $3 \times 4$  的矩阵,其矩阵元素定义为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix},$$

$$M' = \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} & m'_{14} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} & m'_{24} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} & m'_{34} \end{bmatrix}.$$

在齐次坐标系下,由针孔摄像机模型可得:

$$\begin{aligned} zp &= MP \\ z'p' &= M'P \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $z$  和  $z'$  为尺度因子。进一步推导得出:

$$\begin{cases} p \times MP = 0 \\ p' \times M'P = 0 \end{cases} \quad (11)$$

利用最小二乘法求解(11)式中的方程组,可得:

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (12)$$

式中  $A$  和  $b$  分别为

$$A = \begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \\ u' m'_{31} - m'_{11} & u' m'_{32} - m'_{12} & u' m'_{33} - m'_{13} \\ v' m'_{31} - m'_{21} & v' m'_{32} - m'_{22} & v' m'_{33} - m'_{23} \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - vm_{34} \\ m'_{14} - u' m'_{34} \\ m'_{24} - v' m'_{34} \end{bmatrix}.$$

## 5 实验结果与分析

为了验证算法的有效性,针对多种焊接场景进行了实验测试,并从激光条纹中心提取效果和焊缝三维空间信息精度两个方面进行了分析。实验所采用摄像机为 MV-VS030FC 工业相机,分辨率为  $640 \times 480$ ,帧速率为 60 frame/s,计算机平台为 Intel 酷睿 2 双核 2.0 GB,内存 2 GB。

激光条纹中心提取效果如图 5 所示,图 5(a)为激光条纹原图像,图 5(b)为激光条纹轮廓提取效果图,图 5(c)为本文方法提取的条纹中心效果图。图 5 中第一行为“U”字形焊缝场景图,可以看出该场景基本没有外界噪声干扰,本文方法可以较准确地提取出条纹中心线。第二行为“V”字形焊缝场景图,在该场景中焊枪的角度相对图 5(a)中发生了较大的变化,焊缝凹槽部分比较光滑,激光在凹槽侧面存在较多的镜面反射,导致凹槽部分激光条纹发生较大的变形,条纹轮廓线有较大的曲率变化,本文方法能够有效地克服光照影响。第三行也是“V”字形焊缝场景图,在该场景中焊缝凹槽连接点部分较为粗糙,导致激光条纹在该处被割断,可以看出本文方法能够根据相邻像素的曲率变化有效地对轮廓点进行分段,正确计算出轮廓横截面法向量,进而计算出被割断条纹部分的中心线。

表 1 为平板式焊缝  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向坐标的计算值与实测值的差值,其中实测值从机器人定位系统获取。同时,本文将算法应用于多种焊接场景下的 550 张图片,算法平均处理时间为 24.3ms,可以满足实际焊接应用对实时性和准确性的需求。

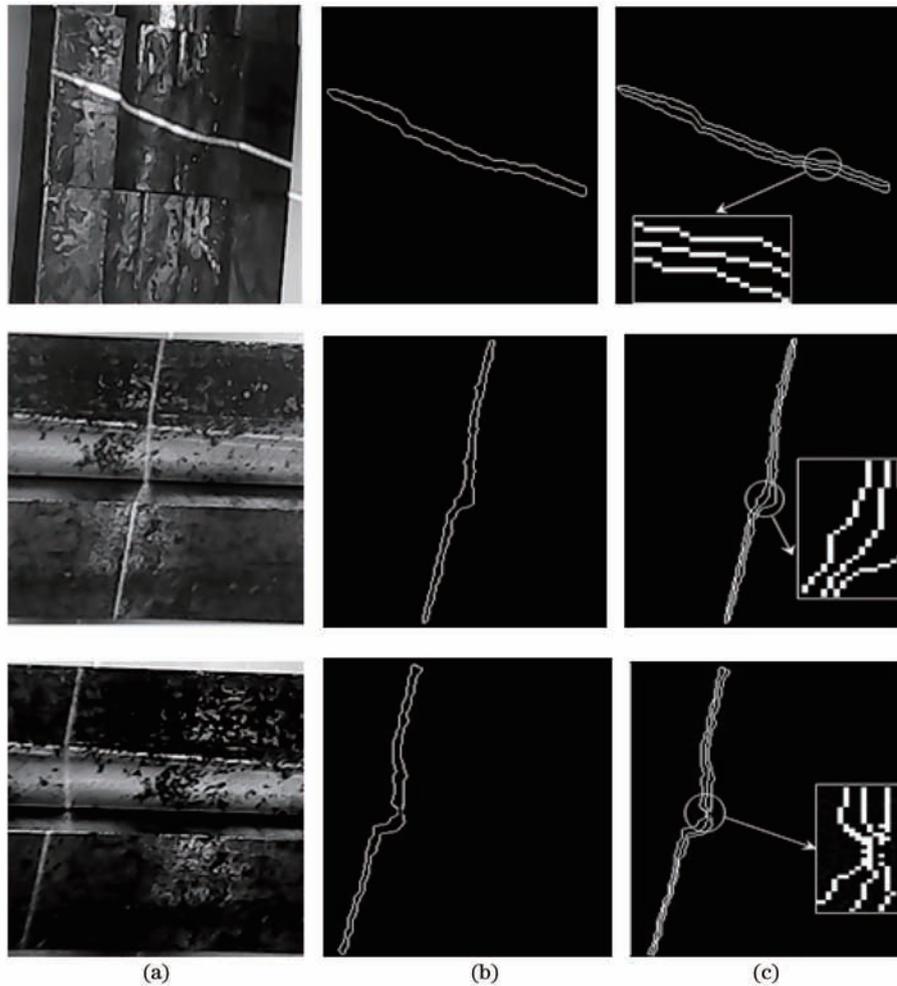


图5 实验结果。(a)原图;(b)条纹轮廓图;(c)本文方法结果

Fig.5 Experimental results. (a) Original picture ; (b) contour map; (c) results of our method

表1 平板式焊缝三维空间坐标值误差分析

Table 1 Error analysis of 3D coordinate flat panel weld

No.	Direction error of 3D coordinate		
	$\Delta x$ /mm	$\Delta y$ /mm	$\Delta z$ /mm
1	-0.012	0.210	0.534
2	0.063	0.223	0.766
3	-0.130	0.212	0.563
4	-0.254	0.247	0.603
5	0.057	0.238	0.534

## 6 结 论

提出了一种快速、准确的焊缝三维重建方法。该方法能够充分利用激光条纹轮廓关键点提高算法执行速度,根据光刀能量的正态分布特点提取条纹中心。实验结果证明,本文方法可以满足自动机器人焊接系统的应用要求。在后续的工作中,将融合焊接机器人的焊枪三维空间运行轨迹来进一步提高算法的准确度。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Ning, Lu Rongsheng, Xia Ruixue, *et al.*. A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 179-184.

刘宁卢, 荣 胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 179-184.

- 2 Cai Ruiyan. Dual-frequency three-dimensional profilometry measurement based on mean method of spatial domain [J]. Computer Engineering, 2012, 38(8): 239-241, 245.  
蔡睿妍. 基于空域均值法的双频三维轮廓测量[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 239-241, 245.
- 3 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi, *et al.*. Calibration method for three dimensional measurement system based on linear structure light [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 182-188.  
张维光, 赵宏, 张琦, 等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 182-188.
- 4 Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508004.  
刘振, 李声, 冯常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508004.
- 5 Tian Qingguo, Ge Baozhen, Li Yunpeng. Real-time extraction of light stripe central line based on contour polygonal representation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1357-1364.  
田庆国, 葛宝臻, 李云鹏, 等. 利用轮廓线多边形表示实时提取光带中心线[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1357-1364.
- 6 Wang Kun, Wang Lei, You Anqing. Detection and tracking algorithm for head of UAV based on local contour features [J]. Optical Technique, 2011, 37(2): 178-182.  
王坤, 王磊, 游安清. 基于局部轮廓特征的无人机头部检测跟踪算法[J]. 光学技术, 2011, 37(2): 178-182.
- 7 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Chen Chenghe. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1057-1062.  
熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1057-1062.
- 8 Chai Yuting, Wang Zhao, Gao Jianmin, *et al.*. Highlight removal based on frequency-domain filtering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051205.  
柴玉亭, 王昭, 高建民, 等. 基于频域滤波的高光去除方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051205.
- 9 Cui Xijun, Yang Chuan, Liu Baohua, *et al.*. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe [J]. J Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41(1): 73-76.  
崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 73-76.
- 10 Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Du Dong, *et al.*. 3-D vision-based trajectory tracking of welding robots [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(8): 1270-1273.  
张文增, 陈强, 都东, 等. 基于三维视觉的焊接机器人轨迹跟踪[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(8): 1270-1273.