

## 白车身孔槽类特征三维坐标在线测量方法研究

胡彦强<sup>1,2</sup>, 马 钺<sup>1</sup>, 许 敏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为实现白车身孔槽类特征三维坐标的视觉测量, 在双目立体视觉测量原理的技术上, 以激光器辅助扫描被测孔槽完成三维测量, 针对圆孔和复合孔槽边缘及孔心坐标的空间定位问题, 提出一种在线测量方法。采用 Canny 边缘检测和 Ramer 算法分割出圆弧部分完成孔边缘的粗定位, 结合 Bazen 方法与正交多项式拟合法实现亚像素边缘点坐标的精确定位, 并通过权重拟合得到椭圆参数方程。在线激光光纹中心线提取过程中, 融合极值法、阈值法与重心法, 将拟合椭圆与光纹中心线的交点作为双目立体视觉的匹配点, 进而完成空间点三维坐标的测量。实验结果表明, 提出的方法鲁棒性好, 对圆孔类特征的综合定位精度高。

**关键词:** 白车身; 被测孔槽; 双目立体视觉; 线激光光纹; 亚像素边缘

中文引用格式: 胡彦强, 马 钺, 许 敏. 白车身孔槽类特征三维坐标在线测量方法研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(10): 186-191, 197.

英文引用格式: HU Yanqiang, MA Yue, XU Min. Study of On-line Measurement Method for 3D Coordinates of Body-in-White Hole Slot Features[J]. Computer Engineering, 2017, 43(10): 186-191, 197.

## Study of On-line Measurement Method for 3D Coordinates of Body-in-White Hole Slot Features

HU Yanqiang<sup>1,2</sup>, MA Yue<sup>1</sup>, XU Min<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**【Abstract】** In order to realize the visual measurement for the 3D coordinates of body-in-white hole slot feature based on the principle of binocular stereo vision measurement, the laser is used as the auxiliary equipment to scan the tested hole slot to complete 3D measurement. Aiming at the space location problem of round hole, compound hole edge and hole core coordinate, an on-line measurement method is proposed. Canny edge detection and Ramer algorithm are used to segment the circular arcs for completing the rough positioning of hole edges. The precise localization of the sub-pixel edge point coordinates is realized by combining the Bazen algorithm and the orthogonal polynomial fitting method. And the ellipse parameter equation is obtained by weight fitting. During online extraction of laser stripe centerline, combining the extremum method, threshold method and gravity method, the intersection points of the fitted ellipse and the center line of light are used as the matching points of binocular stereo vision, and then the 3D coordinates of space points are measured. Experimental results show that the proposed method is of strong robustness, and the comprehensive positioning accuracy of the round hole type is high.

**【Key words】** body-in-white; tested hole slot; binocular stereo vision; line laser stripe; sub-pixel edge

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.10.031

### 0 概述

白车身孔类特征一般分为安装孔和定位孔。在白车身的焊装过程中, 由于冲压零件尺寸误差、工装定位误差、焊接热变形、设计公差累积等均可能造成白车身关键定位孔及安装孔的位置偏差, 导致后续整车装配困难, 影响整车配合性能<sup>[1]</sup>。因此, 在白车

身制造过程中, 需要对车身的定位孔及安装孔的空间位置进行测量。传统的三坐标测量方法<sup>[2]</sup>为使用三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)或多关节测量机, 测量精度高, 但其对测量环境要求高, 测量速度慢, 难以满足在线测量的要求。

针对白车身孔类特征在线测量, 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室将双目立体视觉传

作者简介: 胡彦强(1990—)男, 硕士研究生, 主研方向为机器视觉、图像处理; 马 钺, 研究员; 许 敏, 副研究员。

收稿日期: 2016-07-18 修回日期: 2016-09-06 E-mail: huyanqiang@sia.cn

感器应用于白车身孔位置和尺寸的测量<sup>[3-4]</sup>,但双目立体匹配困难导致立体视觉测量很难达到理想的测量精度。文献[5]提出摆动式线激光单目视觉传感器的测量系统方案,该测量系统对薄板类冲压孔的测量精度较高,但在测量厚板类定位孔及安装孔时,线激光光纹会在被测孔厚度上产生噪声段,导致孔边缘定位出现偏差。

为实现白车身孔槽类特征的在线测量,本文在分析双目立体视觉与线结构光视觉测量原理的基础上,提出双目与线结构光复合式视觉测量方法。该测量方法可以同时获得被测孔的灰度图像与线结构光图像,通过图像处理获得孔槽类边缘特征以及结构光光纹中心线,两者的交点即为双目视觉的匹配点,最后由极限约束关系可获得孔槽类边缘点的三维空间坐标。

### 1 视觉传感器测量原理及数学模型

图 1 为本文采用的测量系统模型,激光器扫描孔槽特征,与孔槽相交于两点,由双目立体视觉三维测量原理可计算其空间坐标。双目立体视觉三维测量基于视差原理,若已知两摄像机之间的位置关系,便可以获取两摄像机公共视场内特征点的三维坐标。

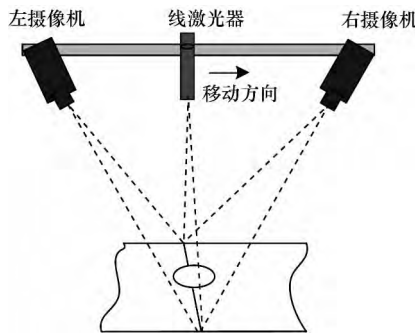


图 1 测量系统模型

图 2 所示为标准外极线几何结构<sup>[6]</sup>的原理图,两摄像机的投影中心连线的距离,即基线距为  $b$ ,摄像机坐标系下空间点  $P(x_c, y_c, z_c)$  在左右摄像机下的图像坐标分别为  $p_l(x_{left}, y_{left})$  和  $p_r(x_{right}, y_{right})$ 。

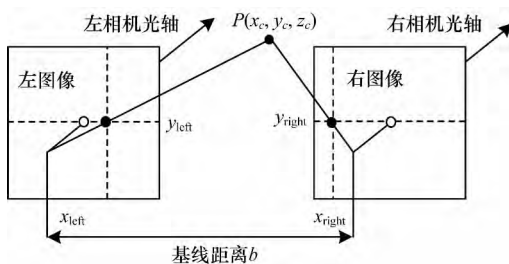


图 2 双目立体视觉测量原理

若假设同名点  $P_l$  与  $P_r$  的图像  $y$  轴坐标相同,即  $y_{left} = y_{right} = y$ 。由透视变换得:

$$x_{left} = \frac{fx_c}{z_c s_x}, x_{right} = \frac{f(x_c - b)}{z_c s_x}, y = \frac{fy_c}{z_c s_y} \quad (1)$$

视差为:

$$disparity = |x_{left} - x_{right}| = x_{left} - x_{right} \quad (2)$$

由三角形相似原理,当  $s_x = s_y$  时,通过视差值即可得出空间点  $P(x_c, y_c, z_c)$  的三维坐标值为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{bx_{left}}{disparity} \\ y_c = \frac{by}{disparity} \\ z_c = \frac{bf}{disparity} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 白车身关键定位孔槽图像处理方法

### 2.1 孔槽类特征目标区域分割与分类

在同轴光源照射下,测量系统采集含有目标孔槽的图像,并基于迭代阈值法对校正后的图像进行二值化阈值处理。通过二值图像边缘搜索算法,可以给出图像边缘的位置信息及边缘的拓扑关系<sup>[7]</sup>。阈值处理和形态学运算后的二值化图像同时包含目标特征和噪声,即  $I = \{z_i\}_{i=1}^N$ ,其中  $z_i$  为第  $i$  个连通区域; $N$  为连通区域总数。根据图像边缘轮廓属性(区域面积、圆弧度等)选择连通区域中的目标圆孔以及复合孔槽。

1) 采用行(列)粗略定位特征区域,统计连通区域的像素个数作为区域面积  $S$ ,提取区域面积在  $(S_{min}, S_{max})$  内的连通区域:

$$S_{min} < S < S_{max} \quad (4)$$

其中  $S_{min}$  和  $S_{max}$  为区域面积阈值。

2) 圆度指标  $C$  是用来描述图形形状接近圆形的程度,其幅值反映了被测量边界的复杂程度<sup>[7]</sup>。分别计算面积阈值后连通区域的圆度,目前普遍采用圆度指标的表达式为:

$$C = 4\pi S/L^2 \quad (5)$$

其中  $S$  为连通区域的面积; $L$  为连通区域的轮廓周长; $C$  取值区间为  $(0, 1]$ ,该值越大,表示该连通区域越接近于圆形。取连通区域边缘圆弧度:

$$C > T$$

其中  $T$  为轮廓圆度阈值。行值约束剔除无关孔槽区域,选择合适的面积、圆度阈值参数实现目标孔槽特征区域的定位。图 3 为目标孔槽特征分类的结果。图 3 中上侧面积最大的区域为复合孔槽,该轮廓由 2 个直径为 38 mm 的圆弧和 2 条线段构成,若要获得其几何中心,需要分割出轮廓上下 2 个弧段并分段拟合。



图3 孔槽类特征分类选择

### 2.2 孔槽类特征边缘亚像素提取

针对复合孔槽几何中心求解的复杂性,本文提出亚像素定位与拟合算法流程,该算法对圆孔边缘亚像素提取也适用,其流程如图4所示。对目标区域分别执行一次形态学膨胀运算和一次腐蚀运算,并将两者的差集区域作为感兴趣区域。Canny算法是一种非常有效的最优边缘检测算法<sup>[8]</sup>,利用该算法不仅能实现像素级边缘粗定位,还能获得梯度矢量 $[G_x(x,y) \quad G_y(x,y)]^T$ 。

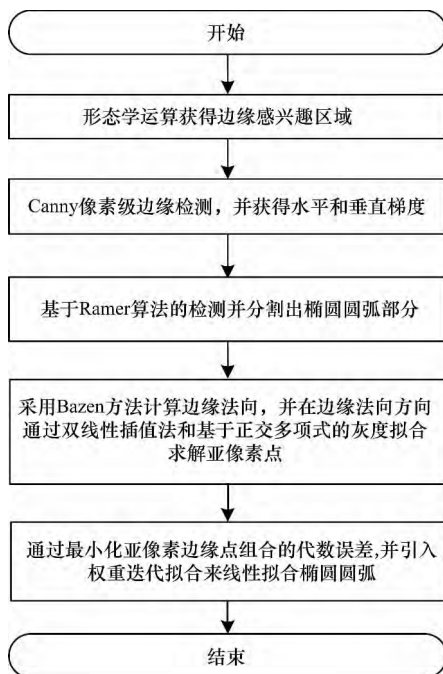


图4 亚像素边缘定位与拟合算法流程

梯度矢量定义为:

$$\begin{bmatrix} G_x(x,y) \\ G_y(x,y) \end{bmatrix} = \text{sign}\left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}\right) \begin{bmatrix} \frac{\partial I(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $I(x,y)$  代表灰度图像在  $x$  方向和  $y$  方向上的

卷积模板分别为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Canny 检测出复合孔槽像素级边缘后,以基于 Ramer 算法的递归分割思想分割出椭圆圆弧部分。Ramer 算法是对轮廓进行递归细分,直到所得全部线段到各自对应的轮廓段的最大距离小于某一指定的阈值<sup>[9]</sup>。图5阐明了 Ramer 算法实现过程。基于 Ramer 算法的递归分割思想首先指定一个距离阈值  $d$ ,采用 Ramer 算法执行多边形递归逼近,椭圆拟合到多边形中彼此相邻线段对应的轮廓段上,通过比较圆弧的拟合误差和2条直线的最大误差,判断这2条相邻多边形线段是否能被标记成合并处理的对象,迭代处理直至没有能被合并的线段结束。

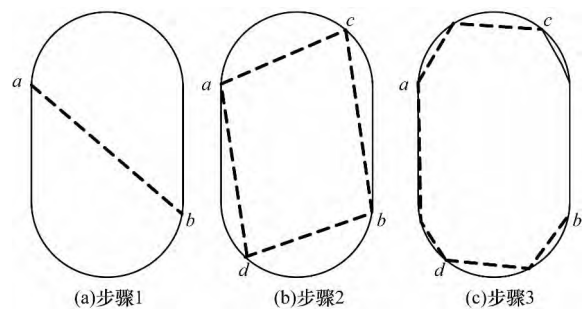


图5 Ramer 算法实现过程

分割出复合凹槽的上下2个圆弧之后,完成了目标圆弧的粗定位。采用文献[10]方法计算在圆弧边缘点 $(i,j)$ 处的法向,为提高像素级边缘法向的精度和稳定性,取像素点 $(i,j)$ 为中心的  $w \times w$  区域内的平均灰度梯度来计算该点的法向量<sup>[11]</sup>,则法向角  $\theta(i,j)$  计算公式为:

$$\Phi = \frac{1}{2} \angle (G_{xx} - G_{yy} \quad 2G_{xy}) \quad (7)$$

其中  $\Phi$  为平均梯度方向角,且  $-\frac{1}{2}\pi < \Phi \leq \frac{1}{2}\pi$ 。由向量夹角公式,可求得:

$$\angle(x,y) = \begin{cases} \tan^{-1}(y/x), & x \geq 0 \\ \tan^{-1}(y/x) + \pi, & x < 0 \wedge y \geq 0 \\ \tan^{-1}(y/x) - \pi, & x < 0 \wedge y < 0 \end{cases} \quad (8)$$

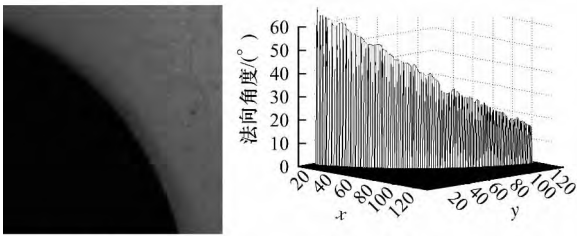
另外:

$$\begin{cases} G_{xx}(i,j) - G_{yy}(i,j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} (G_x^2(u,v) - G_y^2(u,v)) \\ G_{xy}(i,j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2G_x(u,v)G_y(u,v) \end{cases} \quad (9)$$

其中  $G_{xx} - G_{yy}$  与  $G_{xy}$  分别为均方梯度向量的实部和虚部; 平均梯度方向角  $\Phi(i, j)$  与方向角互余。则:

$$\theta(i, j) = \begin{cases} \Phi(i, j) + \frac{1}{2}\pi, & \Phi \leq 0 \\ \Phi(i, j) - \frac{1}{2}\pi, & \Phi > 0 \end{cases} \quad (10)$$

图 6 (a) 为复合孔槽局部图, 结合式 (7) ~ 式 (10) 对其求解边缘法向角, 可得图 6 (b) 所示结果, 易得点  $(i, j)$  处的法向方程。



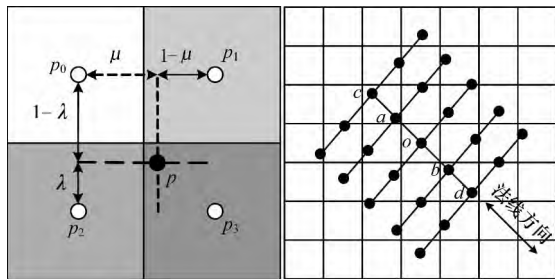
(a) 复合孔槽局部图 (b) 边缘法向角的求解结果

图 6 文献 [10] 方法的边缘法向角计算

如图 7 所示  $p$  点为某边缘像素点, 在  $o$  点两侧沿着法向方向以一个像素为单位各选取 2 个点。考虑到选取的 4 个点并不在像素中心 (即为非整数) 和插值精度的问题, 本文选择双线性插值算法计算插值点的灰度值, 其求解方法为对目标像素点邻域内的 4 个像素点权重求和。假设插值点为  $p$  与左上角像素邻域点  $p_0$  的水平距离分别为  $\mu$  和  $1 - \lambda$ , 可由式 (11) 求出插值点灰度值:

$$g' = \lambda(\mu g_1 + (1 - \mu) g_0) + (1 - \lambda)(\mu g_3 + (1 - \mu) g_2) \quad (11)$$

其中  $g_1, g_2, g_3, g_4, g'$  分别为插值点邻域内的 4 个像素点灰度值和插值点的灰度值。



(a) 原图 (b) 选取图  
图 7 双线性插值法求取的插值点灰度

为提高数据的拟合精度, 兼顾检测效率, 选取上述 4 个像素点灰度值 ( $a, b, c, d$  和  $o$ ) 采用基于正交多项式的曲线拟合方法 [12] 对 5 个像素点的灰度值拟合, 并根据灰度拟合函数的二阶导数过零点的

性质实现亚像素点的定位。文中采用基于正交多项式的曲线拟合是为了解决常规算法中拟合多项式阶数大于 3 阶时方程组容易出现病态的情况 [13]。

$n$  阶多项式曲线表达式为:

$$f(x) = a_0^* \varphi_0(x) + a_1^* \varphi_1(x) + \dots + a_n^* \varphi_n(x) \quad (12)$$

其中  $a_k^* = \frac{(\omega_i \varphi_k(x))}{(\varphi_k(x) \varphi_k(x))}$  为残差平方和函数取极小值的唯一解;  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$  为正交基多项式函数, 其表达式为:

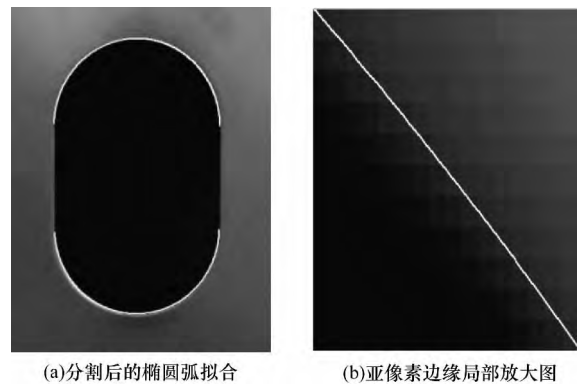
$$\begin{cases} \varphi_0(x) = 1 \\ \varphi_1(x) = (x - a_0) \\ \varphi_{1+k}(x) = (x - a_k) \varphi_k(x) - \beta_{k-1} \varphi_{k-1}(x) \end{cases} \quad (13)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, n - 1$ 。

依次完成圆弧边缘点集合的亚像素定位, 采用文献 [14] 提出的线性方法, 通过最小化边缘点组合的代数误差拟合椭圆圆弧。为了减小离群值的影响, 提高椭圆拟合的鲁棒性, 本文引用权重迭代拟合。采用 Huber 权值函数定义为:

$$\omega(\delta_i) = \begin{cases} 1, & |\delta_i| \leq \tau \\ \tau/|\delta_i|, & |\delta_i| > \tau \end{cases} \quad (14)$$

其中  $\tau$  为消波因数, 它定义哪些点被视为离群值。代数距离  $|\delta_i| \leq \tau$  的点将获得更小的权重, 对距离  $|\delta_i| > \tau$  的点, 其权值均为 1。引用权重后, 分割后的椭圆弧拟合如图 8 (a) 所示。图 8 (b) 为亚像素边缘局部放大图。



(a) 分割后的椭圆弧拟合 (b) 亚像素边缘局部放大图  
图 8 复合孔槽圆弧的亚像素点拟合结果

### 2.3 双目匹配特征点获取

针对线激光光纹中心的提取, 本文融合极值法、阈值法和重心法, 提出阈值的逼近策略, 极大减少了噪点对提取精度的影响, 如图 9 所示。其算法思想为由极值法确定每行截面光强最大点的位置, 截取

最大点两侧各  $n$  个点,并在此区间内采用阈值逼近策略确定最终阈值,最后用灰度重心法计算出光纹中心。

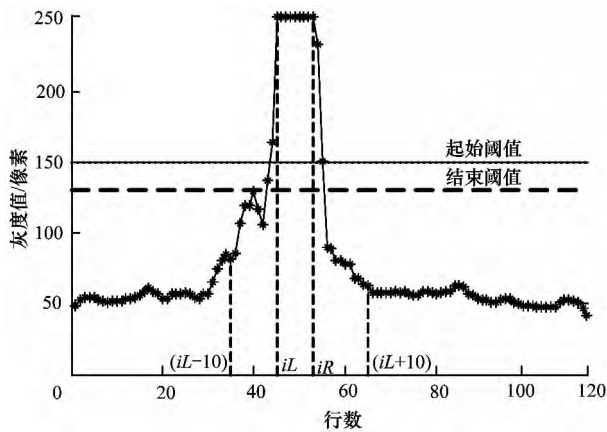


图9 阈值逼近策略

算法步骤如下:

**步骤1** 由迭代法确定初始分割阈值,图10为光纹截面图,观察到激光条纹有一定的宽度,通过极值法确定光纹截面上灰度最大值所在列  $iL$  与  $iR$ ,分别截取最大值位置两侧各  $n$  (这里  $n=10$ ) 个点,搜索结束点分别为  $iL-n$  与  $iR+n$ 。

**步骤2** 在  $[iL-n, iL], [iR, iR+n]$  中,分别取离初始阈值最近的离散点作为左、右搜索起始点,在搜索区间内,从起始点分别向远中心点侧逐一搜索。

**步骤3** 以邻域像素点判断拐点,并存储两侧极大拐点值。若存在拐点值,则取两侧拐点中灰度最大值作为最终阈值;若不存在拐点值,则取光纹中心计算空间为  $[iL, iR]$ 。

**步骤4** 根据灰度重心法,由有效的计算区间  $[p, q]$  及区间内对应点的灰度值  $g(i)$  计算激光光纹中心。该行灰度重心为:

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=p}^q i \times g(i)}{\sum_{i=p}^q g(i)} \quad (15)$$

遍历所有行,计算获得所有光纹中心点。

线激光扫描孔槽特征,分别提取2幅图像中线激光光纹中心并根据最小二乘法拟合,此时将直线方程与图8中复合孔槽的上下圆弧的交点作为同名点,由式(3)便可计算出匹配点的三维坐标。图10所示为匹配特征点示意图,此时光纹中心拟合直线与复合孔槽的拟合圆弧相交于两点,通过匹配获得边缘的2个三维坐标点。

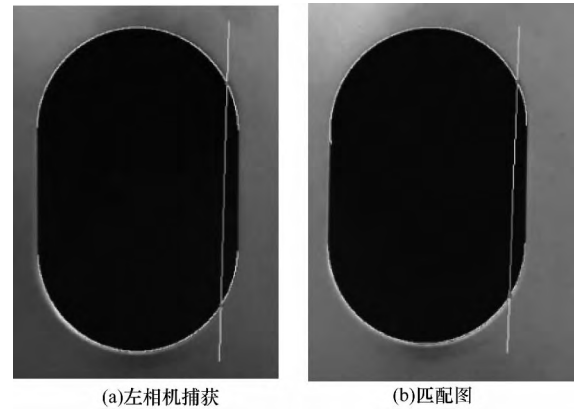


图10 匹配特征点示意图

### 3 实验结果与分析

为了验证系统的测量精度和鲁棒性,本文分别对华晨中华某轿车多个A柱标准件的复合孔槽、圆孔测量,以孔槽尺寸参数和孔心距误差来衡量系统的测量精度。实验室采用的摄像机为映美精 DMK-23GP031 单色相机,分辨率为  $2592 \text{ 像素} \times 1944 \text{ 像素}$ ,最大帧率为  $15 \text{ frame/s}$ ,型号为 M1608-5mp-2 的 WARKOMA 威科迈工业镜头,Coherent 公司的 StingRay 系列波长为  $660 \text{ nm}$  的激光器,计算机平台为 Intel 3.2 GHz 四核 CPU 和 8 GB 内存。首先,采用标定法<sup>[15]</sup>对双目立体视觉系统进行标定,左右摄像机分别采集标准部件的局部图像并校正,校正结果如图11所示。其中,左侧图为左摄像机捕获,根据本文提出的轮廓点云求解算法获得图3中3个孔槽的边缘点云。

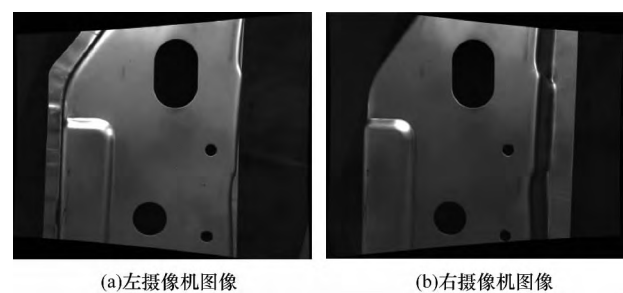
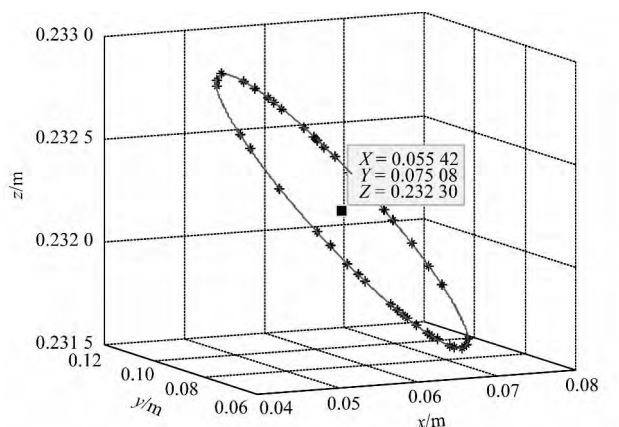
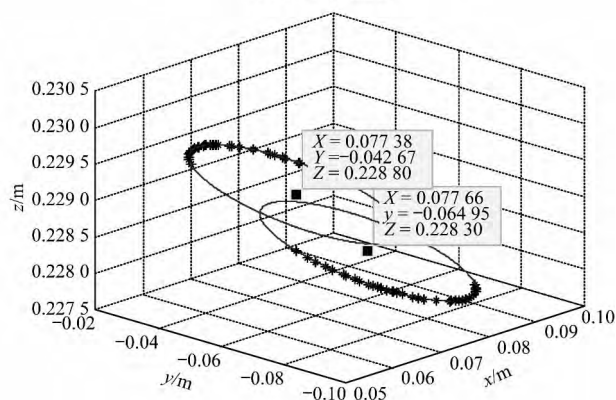


图11 校正后的左右摄像机图像

本文采用降维法<sup>[16]</sup>计算孔槽类特征的位姿参数,将三维点云坐标数据转换到局部坐标系下完成平面圆的拟合,再将拟合得出的圆心和半径转换至摄像机坐标系,从而得到孔槽类特征的位姿参数和直径大小。以视场内左下方较大的圆孔和复合孔槽为例,其拟合结果和位姿参数如图12所示。



(a) 下方较大圆孔



(b) 复杂孔

图 12 复合凹槽与圆孔在摄像机坐标系的位姿参数

以如图 13 所示的 A 柱标准部件局部三维数学模型为参考, 进行多组测量后得到表 1 和表 2 的数据结果。表 1 的复合孔槽、大圆孔及小圆孔的参考值分别为 38 mm, 30 mm, 10 mm; 表 2 的  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  参考值分别为 129.83 mm, 74.11 mm, 81.65 mm。

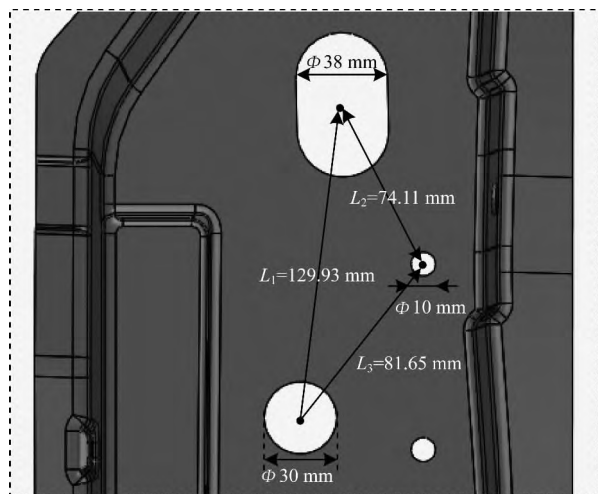


图 13 A 柱标准部件的局部三维数学模型

表 1 圆孔和复合凹槽孔参测量值 mm

序号	复合孔槽	大圆孔	小圆孔	误差
1	37.95 37.98	30.03	10.06	$\pm 0.06$
2	37.92 38.02	30.09	10.00	$\pm 0.09$
3	38.02 38.00	29.96	9.98	$\pm 0.06$
4	38.00 38.01	30.00	10.03	$\pm 0.03$
5	37.95 38.04	29.98	9.93	$\pm 0.07$

表 2 孔心距计算结果及误差 mm

序号	$L_1$	$L_2$	$L_3$	误差
1	129.54	74.029	81.520	$\pm 0.290$
2	129.37	73.980	81.379	$\pm 0.450$
3	129.77	73.850	82.030	$\pm 0.379$
4	129.79	74.018	81.840	$\pm 0.388$
5	130.13	74.130	82.050	$\pm 0.400$

在标准部件局部数模中,  $L_1$  代表复合孔槽与局部图左下方圆孔中心的孔心距,  $L_2$  为复合孔槽与右侧中部、直径较小的圆孔之间的孔心距,  $L_3$  为大圆孔和小圆孔之间的孔心距。

由表 1 和表 2 可知, 被测圆孔和复合凹槽的直径测量误差能控制在  $\pm 0.09$  mm, 孔心距的误差控制在  $\pm 0.45$  mm, 在较大视场内获得较高精度, 满足测量误差控制在  $\pm 0.6$  mm 内的要求。

#### 4 结束语

本文将线结构光发射器引入到双目立体视觉传感器中, 解决了双目立体视觉匹配点难以精确定位的问题。针对白车身圆孔及复合孔槽边缘及孔心的空间定位问题, 提出了一种综合使用目标轮廓边缘与激光光纹中心相结合的定位方法。通过对白车身 A 柱冲压件的测量实验表明, 本文提出的方法能够满足白车身关键点测量的精度要求, 为白车身关键尺寸控制点的在线测量提供理论依据。

#### 参考文献

- [1] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 余文超, 齐二石. 在线测量技术应用于白车身的生产尺寸监控 [J]. 机械设计与研究, 2014(2): 96-98.
- [3] 刘常杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 汽车白车身在线激光视觉检测站 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 683-684.
- [4] 薛 婷. 三维视觉检测仪器化关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [5] 李凌旻, 尚 校, 李 靖, 等. 线激光扫描的白车身装配特征机器人在线检测技术研究 [J]. 测试技术学报, 2014, 28(3): 255-263.
- [6] 江 荔, 薛醒思. 基于局部标准匹配结果的本体匹配技术 [J]. 信息与控制, 2016, 45(1): 66-72.

(下转第 197 页)

#### 4 结束语

本文根据固定摄像头的实际工程应用场景,提出一种人体行为识别方法。实验结果表明,该方法能在满足实时性要求的同时保持较高的识别率,适用于诸如智能摄像头一类的计算资源有限的嵌入式视频监控系。本文的不足之处是仅限于在背景静止的场合下使用,在非静止背景情况下其识别率会显著降低。如何结合其他相关算法将所提算法应用于非静止背景下的人体行为识别是本文后续的研究方向。

#### 参考文献

- [1] 胡琼,秦磊,黄庆明.基于视觉的人体动作识别综述[J].计算机学报,2013,36(12):2512-2524.
- [2] WANG L,SUTER D. Informative Shape Representations for Human Action Recognition [C]//Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. Washington D. C. ,USA: IEEE Press,2006:1266-1269.
- [3] DERPANIS K G,SIZINTSEV M,CANNONS K,et al. Efficient Action Spotting Based on a Spacetime Oriented Structure Representation [C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. , USA: IEEE Press,2010:1990-1997.
- [4] OLIVIERI D N,CONDE I G,SOBRINO X A V. Eigenspace-based Fall Detection and Activity Recognition from Motion Templates and Machine Learning [J]. Expert Systems with Applications,2012,39(5):5935-5945.
- [5] WANG H,SCHMID C. Action Recognition with Improved Trajectories [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C. USA: IEEE Press,2013:3551-3558.
- [6] VRIGKAS M,KARAVASILIS V,NIKOU C,et al. Matching Mixtures of Curves for Human Action Recognition [J]. Computer Vision and Image Understanding,2014,119(2):27-40.
- [7] ABRAMSON N,BRAVERMAN D,SEBESTYEN G. Pattern Recognition and Machine Learning [M]. [S. l. ] Academic Press,2006.
- [8] GÓMEZ-CONDE I,OLIVIERI D N. A KPCA Spatio-temporal Differential Geometric Trajectory Cloud Classifier for Recognizing Human Actions in a CBVR System [J]. Expert Systems with Applications,2015,42(13):5472-5490.
- [9] GUAN Yepeng. Robust Video Foreground Segmentation and Face Recognition [J]. Advances in Manufacturing,2009,13(4):311-315.
- [10] FARNEBÄCK G. Two-frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion [J]. Image Analysis,2003,2749:363-370.
- [11] LIN Z,JIANG Z,DAVIS L S. Recognizing Actions by Shape-motion Prototype Trees [C]//Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C. ,USA: IEEE Press,2009:444-451.
- [12] LIU J,SHAH M. Learning Human Actions via Information Maximization [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. USA: IEEE Press,2008:1-8.
- [13] WANG H,KLÄSER A,SCHMID C,et al. Action Recognition by Dense Trajectories [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C. ,USA: IEEE Press,2011:3169-3176.
- [14] JHUANG H,SERRE T,WOLF L,et al. A Biologically Inspired System for Action Recognition [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Computer Vision. Washington D. C. USA: IEEE Press,2007:1-8.
- [15] SCHULDT C,LAPTEV I,CAPUTO B. Recognizing Human Actions: A Local SVM Approach [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington D. C. ,USA: IEEE Press,2004:32-36.

编辑 刘冰

(上接第191页)

- [7] 薛婷,孙梅,张涛,等.类椭圆特征自动识别及亚像素提取的完整实现[J].光电子·激光,2008,19(8):1076-1078.
- [8] 肖传民,史泽林,夏仁波,等.一种基于视觉显著性的边缘检测算法[J].信息与控制,2014,43(1):9-13.
- [9] RAMER U. An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves [J]. Computer Graphics and Image Processing,1972,1(3):244-256.
- [10] BAZEN A M,GEREZ S H. Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(7):905-919.
- [11] 江永付,江开勇,林俊义.线结构光光条中心亚像素精确提取方法[J].激光与光电子学进展,2015,52(7):185-191.
- [12] 吴恩启,兴磊磊,吴绍民,等.基于曲线拟合的圆锯片变形检测算法[J].光电工程,2015,42(8):8-13.
- [13] 孟中,张涛,郑秀筠,等.正交基函数多项式实时拟合在轴角编码器测速中的应用[J].光学精密工程,2006,14(2):303-307.
- [14] FITZGIBBON A,PILU M,FISHER R B. Direct Least Squares Fitting of Ellipses [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(5):476-480.
- [15] ZHANG Zhengyou. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [16] 张晶,黄琴,兰红军,等.工程测量中空间圆的拟合方法研究[J].计量与测试技术,2011,38(9):31-32.

编辑 顾逸斐