

# 基于立体视觉的汽车安全气囊装配精度测评方法<sup>①</sup>

王晓东<sup>1</sup>, 董 博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(长春工业大学 工程训练中心, 长春 130012)

<sup>2</sup>(长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012)

**摘要:** 本文提出了一种基于双目立体视觉检测而实现汽车安全气囊装配精度测评的方法, 将 CCD 摄像机提供的待测安全气囊的图像与标准安全气囊的三维数模相结合, 建立了汽车安全气囊轮廓检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  以及点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$  作为装配精度参数的评价指标, 自动完成轮廓尺寸参数的计算, 判定待测安全气囊是否合格. 实际验证结果表明, 所建立的立体视觉安全气囊装配精度测评方法和指标可以快速精确的评价汽车安全气囊的装配质量.

**关键词:** 汽车安全气囊; 立体视觉; 装配精度; 评价方法; 轮廓尺寸

## Automobile Airbag Assembly Precision Evaluation Method Based on the Stereo Vision

WANG Xiao-Dong<sup>1</sup>, DONG Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Engineering Training Center, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

<sup>2</sup>(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** This paper proposes a method based on binocular stereo vision detection, which can implement the auto airbag assembly precision of the measurement and evaluation. It combines the image of the airbag under test which is provided by the CCD camera with three dimensional mathematical model of standard airbags, establishes the position tolerances  $V_x, V_y, V_z$  of the car airbag contour detection points, and the shape tolerances  $K$  of the points on the contour curve segment is as evaluation indexes of assembly precision parameters, which can complete contour parameters automatically and determine whether the airbag under test qualified. The actual verification results show that, the assembly quality indexes and methods of stereo vision airbag assembly accuracy of the evaluation can evaluate the assembled quality of the airbag quickly and accurately.

**Key words:** ASM; Sobel operator; Hough circle detection; landmark location; pupil landmarks

随着科学技术的高速发展, 汽车安全气囊的装配工艺要求也越来越苛刻, 但是现阶段的汽车安全气囊检测技术还不是很完善, 如果检测质量不过关, 不仅会影响美观和使用性能, 还会带来安全遗患. 汽车安全气囊内的气袋在安装到塑料材质的罩盖过程中, 会产生挤压、磕碰和撑开等情况, 这些情况可能导致罩盖产生溢料飞边、曲翘变形, 因此安全气囊就无法保证与汽车内部的预留安装孔位置严密吻合, 这会导致汽车在发生交通事故时, 汽车安全气囊无法正常弹出, 进而起不到安全防护的作用.

针对汽车安全气囊在装配过程中罩盖产生的溢料飞边、曲翘变形问题, 现有的汽车安全气囊装配检测方法有卡尺检测和仿形检测等, 存在着检测精度不高, 检测结果重复性差, 检测误判率高, 效率低等缺陷. 因此, 寻找并制定汽车安全气囊装配精度的评价方法迫在眉睫. 双目立体视觉技术具有测量精度高、测量原理简单等优点而被广泛应用于各个领域, 国外的视觉检测技术<sup>[1,2]</sup>发展较早, 而国内的视觉检测技术直到 21 世纪初才逐步发展起来. 利用视觉技术和图像处理技术来进行产品的检测已经成为工业在线生产中的趋势<sup>[3]</sup>. 本

① 基金项目: 吉林省“十大”科技攻关项目(10ZDGG002)

收稿时间: 2015-09-10; 收到修改稿时间: 2015-10-14

文提出了一种基于双目立体视觉技术获取视觉图像评价指标的汽车安全气囊装配精度检测的测评方法。

## 1 汽车安全气囊视觉图像的获取和边缘轮廓的三维重建

### 1.1 图像的获取和边缘提取

通过自行搭建的双目立体视觉测量系统采集汽车安全气囊视觉图像,图 1 为系统的硬件,主要是一对松下摄像机、环形光源及控制器、工作平台和计算机等组成.使用 MATLAB 标定工具箱分别对两台摄像机进行单相机标定,获得每个摄像机的内参数和外参数,再通过 VS2010 中的 OpenCV 对标定好的相机进行立体标定,获得两个摄像机之间位置关系的旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ .图 2 为双目立体视觉系统采集的汽车安全气囊视觉图像,为了保证汽车安全气囊边缘的精确定位,对汽车安全气囊的视觉图像进行了极线校正<sup>[4]</sup>、对比度增强、灰度归一化、Gauss 滤波等图像预处理<sup>[5]</sup>;先利用 Canny 算子提取图像的边缘,图 3 为汽车安全气囊边缘提取后的双目视觉图像.再用数学形态法把边界细化为单像素,对边缘细化过程中在边界上产生的断点进行边界跟踪,填充边界上的断点,得到图像的矢量化表示<sup>[6]</sup>;由此,可得到连续且封闭的汽车安全气囊边缘轮廓二维曲线.



图 1 系统组成



图 2 汽车安全气囊双目视觉图像



图 3 边缘提取后的双目视觉图像

### 1.2 轮廓曲线的分段

本文采用基于轮廓曲线点的支撑区域协方差矩阵的特征点检测方法(A-DEPCM)<sup>[7]</sup>用于轮廓曲线的分段,利用多支撑区域特征值乘积自动检测特征点,该方法不受人为因素的影响,克服了 CSS 方法<sup>[8,9]</sup>中受到曲线上局部变化和噪声的影响,并且避免了选择高斯平滑尺度和求曲线上局部高阶导的问题,具有很好的稳定性和精确性.

假设  $n$  个序列点描述安全气囊的轮廓曲线  $L$ ,即  $L=\{P_i=(X_i, Y_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,其中  $(X_i, Y_i)$  为边界  $L$  上点  $P_i$  的坐标,  $P_{i+1}$  为  $P_i$  邻接点.  $S_k(P_i)$  为边界  $L$  上以  $P_i$  为中心的一小曲线段,  $S_k(P_i)=\{P_j | j=i-k, i-k+1, \dots, i+k-1, i+k\}$  曲线段  $S_k(P_i)$  上的点  $P_j$  的协方差矩阵  $C$  定义如下:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$c_{11} = \left[ \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} x_j^2 \right] - c_x^2$$

$$c_{22} = \left[ \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} y_j^2 \right] - c_y^2$$

$$c_{12} = c_{21} = \left[ \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} x_j y_j \right] - c_x c_y$$

$C_x$  和  $C_y$  是曲线段  $S_k(P_i)$  的几何中心, 即

$$c_x = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} x_j \quad c_y = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} y_j$$

协方差矩阵  $C$  的特征值  $\lambda_L$  和  $\lambda_S$  为:

$$\lambda_L = \frac{1}{2} [c_{11} + c_{22} + \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}]$$

$$\lambda_S = \frac{1}{2} [c_{11} + c_{22} - \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}] \quad (2)$$

由特征值公式可知  $\lambda_L \geq \lambda_S$ , 不同支撑区特征值乘积公式:

$$P(p_i) = \prod_{s \in \Omega} \lambda_S(p_i, s) \quad (3)$$

式中  $\Omega$  表示不同支撑区的集合.

不同支撑区特征值的乘积可以度量曲线上点的特征, 如果点是明显突出的特征点, 则该点的特征值乘

积  $P(P_i)$  就比较大, 给出特征值乘积的阈值  $T_{P(P_i)}$ , 如果点的特征值乘积  $P(P_i)$  大于  $T_{P(P_i)}$ , 则该点为特征点, 否则视该点为曲线上的一般点, 进而可将安全气囊轮廓曲线进行分段。

### 1.3 曲线段匹配

由特征点的透视不变性, 利用正规化交叉相关系数 NCC 和亮度均方差 ASD<sup>[10,11,12]</sup>方法对特征点粗匹配, 定义曲线上一点的势能为  $CEPF(L)$  :

$$CEPF(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{I(x_j, y_j) - I(x_i, y_i)}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \quad (4)$$

其中  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  分别为曲线段  $L$  上第  $i$  个点和第  $j$  个点周围  $l \times k$  范围内第  $j$  个点的坐标,  $I(x_j, y_j)$  和  $I(x_i, y_i)$  为它们的灰度值,  $n$  为曲线段上点的个数,  $m$  为  $l \times k$  范围内像素点的个数。对于左右两幅视图  $I(x, y)$  和  $I'(x, y)$ ,  $L$  和  $L'$  分别为两视图上对应的曲线段, 其匹配度量公式为:

$$\rho(L, L') = \left| \frac{CEPF(L) - CEPF(L')}{CEPF(L) + CEPF(L')} \right| \quad (5)$$

$\overline{CEPF(L)}$  和  $\overline{CEPF(L')}$  为曲线段  $L$  和  $L'$  势能的平均值, 即

$$\overline{CEPF(L)} = \frac{CEPF(L)}{n} \quad (6)$$

$p$  的值大于 0, 值越小两曲线段越相似, 因此  $p$  可以度量曲线段的相似程度, 然后以  $p$  作为度量准则利用动态规划算法<sup>[13]</sup>对匹配点对间的曲线段进行最优化匹配。

### 1.4 轮廓重建

#### 1.4.1 对 1.3 中的匹配曲线段拟合。

在图像  $I_1, I_2$  上的二次曲线段  $C_1, C_2$  可分别表示为:

$$X_1^T C_1 X_1 = 0 \quad X_2^T C_2 X_2 = 0 \quad (7)$$

其中,  $X_1 = (x_1, y_1, 1)^T, X_2 = (x_2, y_2, 1)^T$  分别是图像  $I_1, I_2$  上位于二次曲线  $C_1$  和  $C_2$  上任意点的图像齐次坐标,  $C_1$  和  $C_2$  为  $3 \times 3$  的对称矩阵。由投影方程:

$$s_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} \\ \hat{p}_{12} \\ \hat{p}_{13} \end{bmatrix} X \quad s_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{21} \\ \hat{p}_{22} \\ \hat{p}_{23} \end{bmatrix} X \quad (8)$$

其中,  $\hat{p}_{11}, \hat{p}_{12}, \hat{p}_{13}$  和  $\hat{p}_{21}, \hat{p}_{22}, \hat{p}_{23}$  分别为相机投影矩阵  $\hat{p}_1, \hat{p}_2$  的行向量。将投影方程带入(7)得:

$$X^T \hat{p}_1^T C_1 \hat{p}_1 X = 0 \quad X^T \hat{p}_2^T C_2 \hat{p}_2 X = 0 \quad (9)$$

设左右两摄像机的光心为  $O_1, O_2$ , 则此式为光心  $O_1, O_2$  对应的曲线段  $C_1, C_2$  确定的锥面的交线。

#### 1.4.2 空间曲线段的建立

根据三角测量的原理, 由 1.1 所求的内外参数及旋转矩阵  $R$ 、平移矩阵  $T$ , 确定 1.4.1 中曲线段的端点以及对应曲线段上任一特征点对的三维坐标。求出三维空间点到 1.4.1 中两锥面的每条交线的欧氏距离之和, 距离和最小的交线确定为两幅图像上对应该曲线段所对应的空间曲线段, 图 4 为三维重建图。

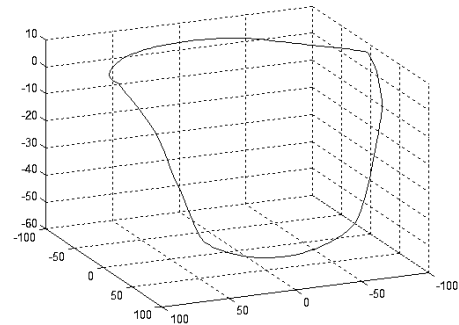


图 4 三维重建图

## 2 汽车安全气囊边缘轮廓的坐标变换

将标准安全气囊 CATIA 三维数模边缘信息提取出来, 并导入 MATLAB 中, 可得到标准安全气囊边缘轮廓的三维坐标, 然而标准三维坐标与待测气囊三维重建坐标不一致, 因此需要将待测气囊三维坐标转化为标准三维坐标。本文采用布尔莎七参数模型<sup>[14]</sup>进行空间坐标变换, 布尔莎七参数模型有 3 个平移参数  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , 3 个旋转参数  $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$  和 1 个尺度参数  $k$ , 公式如下:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{标}} \\ Y_{\text{标}} \\ Z_{\text{标}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{测}} \\ Y_{\text{测}} \\ Z_{\text{测}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

标准安全气囊和待测安全气囊公共点的确定, 本文采用一种新的空间曲线匹配算法<sup>[15]</sup>, 该算法通过曲率计算匹配点对列表, 通过对齐匹配点对的弗朗内特标架进行曲线匹配, 得到一个匹配矩阵集, 从匹配矩阵集中选出一个最优匹配的匹配矩阵, 使得空间曲线的对应点匹配窗口内的距离平方和最小, 进而求得一组标准安全气囊和待测安全气囊公共点对。由标准安全气囊和待测安全气囊的公共点对坐标, 用最小二乘法拟合出相应的七参数, 然后由求得的七参数将待测安全气囊空间坐标转换到标准安全气囊的空间坐标中, 如图 5 所示, 其中红色为标准安全气囊三维曲线, 蓝色为待测安全气囊三维曲线。

### 3 评价指标的建立

通过标准气囊轮廓曲线上的分段点求出到待测气囊轮廓曲线最短距离的点,即为待测气囊上相对应的分段点.通过标准气囊上的检测点求出到待测气囊轮廓曲线最短距离的点,即为待测气囊上相对应的检测点,进而求出检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ ,通过计算标准与待测气囊轮廓对应检测点所在的对应轮廓曲线段之间的 Hausdorff 距离<sup>[16]</sup>,进而求出待测轮廓曲线段的形状公差  $K$ ,将所求形状公差、位置公差与汽车安全气囊标准的三维数模工程图中的形状公差、位置公差相比较,判定是否在误差范围之内.

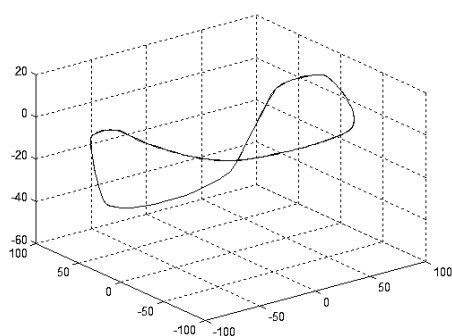


图 5 坐标变换后的三维图

本文建立了汽车安全气囊装配精度的主要评价指标为气囊轮廓检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  以及点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$ . 其中:

$$\begin{aligned} V_x &= X_{测} - X_{标} & V_y &= Y_{测} - Y_{标} \\ V_z &= Z_{测} - Z_{标} \end{aligned} \quad (11)$$

气囊轮廓检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  可以反映汽车安全气囊被测点的实际位置相对于理想位置的变动量,  $|V_x|$ 、 $|V_y|$ 、 $|V_z|$  越大,表明偏移越大、装配精度越低.气囊轮廓检测点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$  可以反映汽车安全气囊检测点所在轮廓曲线段的待测曲线段相对于理想曲线段的变动范围,  $|K|$  越大,表明变动越大、装配精度越低.

### 4 汽车安全气囊装配精度评价

对待测汽车安全气囊的装配精度进行评价,采用双目视觉立体测量系统获取汽车安全气囊轮廓检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  以及点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$ ,部分数据见表 1、表 2、表 3.

表 1 检测点数据(mm)

检测点	X 标	Y 标	Z 标	X 测	Y 测	Z 测
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

F1-DAB	21.32	0	27.7	21.308	-0.012	27.718
F3R-DAB	51.57	74.26	13.55	51.547	74.246	13.497
F3L-DAB	51.57	-74.26	13.55	51.544	-74.239	13.488
F5R-DAB	80.18	92.01	-53.15	80.118	91.973	-53.119
F5L-DAB	80.18	-92.01	-53.15	80.121	-92.042	-53.125
F7R-DAB	77.74	82.01	-84.26	77.679	81.977	-84.234
F7L-DAB	77.74	-82.01	-84.26	77.677	-81.981	-84.236
F9-DAB	77.38	0	-137.3	77.738	-0.017	-137.227

表 2 位置公差数据(mm)

位置公差	$V_x$	$V_y$	$V_z$
F1-DAB	[-0.079,0]	[-0.083,0]	[0,0.996]
F3R-DAB	[-0.104,0]	[-0.457,0]	[-0.882,0]
F3L-DAB	[-0.104,0]	[0,0.457]	[-0.882,0]
F5R-DAB	[-0.156,0]	[-0.968,0]	[0,0.193]
F5L-DAB	[-0.156,0]	[0,0.968]	[0,0.193]
F7R-DAB	[-0.156,0]	[-0.968,0]	[0,0.193]
F7L-DAB	[-0.156,0]	[0,0.968]	[0,0.193]
F9-DAB	[-0.163,0]	[-0.071,0]	[0,0.968]

表 3 形状公差数据(mm)

形状公差	公差范围	测量值(K)
F1-DAB	[0,1]	0.13
F3R-DAB	[0,1]	0.21
F3L-DAB	[0,1]	0.23
F5R-DAB	[0,0.6]	0.17
F5L-DAB	[0,0.6]	0.18
F7R-DAB	[0,0.6]	0.18
F7L-DAB	[0,0.6]	0.21
F9-DAB	[0,0.6]	0.17

由表 1 及表 2 中的数据可以看出:检测点 F1-DAB 的位置公差

$$\begin{aligned} V_x &= X_{测} - X_{标} = 21.308 - 21.32 = -0.012 \text{ mm} \\ V_x &\in [-0.079, 0] \\ V_y &= Y_{测} - Y_{标} = -0.012 - 0 = -0.012 \text{ mm} \\ V_y &\in [-0.083, 0] \\ V_z &= Z_{测} - Z_{标} = 27.718 - 27.7 = 0.018 \text{ mm} \\ V_z &\in [0, 0.996] \end{aligned}$$

由表 3 的数据可以看出:检测点 F1-DAB 所在轮廓曲线段的形状公差  $K=0.13$   $K \in [0, 1]$ ,

分别计算所有的检测点,判断是否在位置公差及形状公差范围之内,进而判定待测安全气囊是否为合格品.

由表中数据可以看出,本文采用双目视觉立体测量系统测量的精度满足汽车安全气囊检测精度的要求.因此,采用气囊轮廓检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  以及点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$  作为汽车安全气囊

装配精度的评价指标,可以为汽车安全气囊装配精度检测的精确评价奠定基础。

## 5 结语

采用双目立体视觉测量系统对汽车安全气囊进行三维测量,完成了气囊边缘轮廓的三维重构、检测点的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  以及点所在轮廓曲线段的形状公差  $K$  的计算。评价指标中的位置公差  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  与三坐标检测本质是一样的,都是检测检测点的位置对基准所允许的变动全量,相比三坐标检测,本文的检测具有降低成本、提高效率、全检的特点。

评价指标中的形状公差  $K$  与传统检测中的仿形检测本质是一样的,都是检测汽车安全气囊轮廓尺寸所允许的的变动量,相比仿形检测,本文的检测具有精度更高,检测误判率更小的特点。

实验结果表明:所得双目立体视觉测量结果可以表征汽车安全气囊装配特征;所提出的汽车安全气囊装配精度评价指标可以评价气囊的装配质量。然而,在实际应用过程中还存在一些难点:一方面,检测点的确定是根据传统检测方法确定的,能否研究出一种智能检测方法来确定检测点,还需要进一步的研究,另一方面在空间曲线重建中仍然存在着匹配精度的问题,本文方法虽然能够满足当今装配精度要求,但是还需更加深入的研究以提高装配精度。

## 参考文献

- 1 Fang X, Hu Y, GAO H. High-speed and high-precision vision detection and locating algorithm of BGA. *Electronics Process Technology*, 2006, 5(2): 33-43
- 2 Li YF, Zhao XH, Li YQ. Vision-based detection of weld pool width in TIG welding of copper-clad aluminum cable. *China Welding*, 2007, 16(3): 73-75.
- 3 吴传国,焦永和,肖陶.计算机视觉和图像处理技术及其在汽车零件检测中的应用. *城市车辆*, 2003, (4): 52-54.
- 4 朱庆生,胡章平,刘然.立体图像对的极线校正. *计算机工程与设计*, 2009, (17): 113-116.
- 5 赵小川. MATLAB 图像处理. 程序实现与模块化仿真. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 124-149.
- 6 邹琼兵,周东翔,蔡宣平.基于边缘细化的角点提取算法. *计算机应用与软件*, 2006, (23): 112-114.
- 7 Zhu QS, Wang YX, Liu HJ. Auto-corner detection based on the eigenvalues product of covariance matrices over multi-regions of support. *Journal of Software*, 2010, 5(8): 907-914.
- 8 Rattarangsi A, Chin RT. Scale-based detection of corners of planar curves. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Apr. 1992, 14 (4): 430-449.
- 9 Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Dec. 1998, 20(12): 1376-1381.
- 10 王宇宙.计算机视觉三维重建理论与应用[博士学位论文].西安:西北工业大学. 2004
- 11 阚江明.基于计算机视觉的活立木三维重建方法[博士学位论文].北京:北京林业大学. 2008.
- 12 邓宝松.基于点线特征的大基线图像序列三维重建技术研究[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学, 2006.
- 13 门宇博,马宁,张国印,李香.非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 47(3): 60-65.
- 14 Zhang H. To prove Bursa-Wolf conversion model simple formula. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2006, 29(2): 46-51.
- 15 王坚,周来水,张丽艳.一种新的空间曲线匹配算法. *中国机械工程*, 2006, 17(16): 1744-1747.
- 16 白彦冰.自由曲线到自由曲线曲面 Hausdorff 距离近似值的计算[学位论文].北京:清华大学, 2011.